

与技术测量

丛树岩　龚雪◎编

★ 高等教育“十三五”规划教材

★ 普通高校机械类各专业基础课配套教材



互换性与技术测量

丛树岩　龚　雪　编



机械工业出版社

本书是严格按照教学大纲进行编写的“互换性与技术测量”课程的教材，书中有理论，有方法，有总结，有实训，非常利于学习与提高。内容主要包括：孔与轴的极限与配合、长度测量基础、几何公差与检测、表面粗糙度、光滑工件尺寸的检测与光滑极限量规设计、圆锥的互换性与检测、滚动轴承的互换性、键与花键连接的互换性与检测、普通螺纹连接的互换性与检测、渐开线直齿圆柱齿轮传动的互换性与检测。读者可按照编写顺序循序渐进地学习，也可挑选部分章节有针对性地学习与提高。

本书可作为高等院校机械类各专业的教材，也可供有关技术人员自学参考。

图书在版编目（CIP）数据

互换性与技术测量/丛树岩，龚雪编．—北京：机械工业出版社，2016.6

ISBN 978-7-111-53423-5

Ⅰ.①互…　Ⅱ.①丛…②龚…　Ⅲ.①零部件—互换性—高等学校—教材②零部件—测量技术—高等学校—教材　Ⅳ.①TG801

中国版本图书馆CIP数据核字（2016）第073260号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号　邮政编码100037）
策划编辑：黄丽梅　责任编辑：黄丽梅
版式设计：霍永明　责任校对：张　薇
封面设计：陈　沛　责任印制：李　洋
北京瑞德印刷有限公司印刷（三河市胜利装订厂装订）
2016年5月第1版第1次印刷
169mm×239mm·14印张·288千字
0001—2000册
标准书号：ISBN 978-7-111-53423-5
定价：35.00元

前　言

“互换性与技术测量”是机械类各专业的一门必修专业基础课程，也是一门信息量大、理论性和实用性都很强的课程，它涉及机械设计、机械制造、产品质量控制、生产组织管理等许多方面。

机电产品设计有三个不可或缺的环节：第一个环节是传动原理的设计；第二个环节是结构的设计；第三个环节是精度的设计。“互换性与技术测量”课程主要介绍在精度设计中所必须具备的一些知识，如机械零件中各种要素的精度参数、相关的控制标准，以及它们在设计图样上的表示方法等。此外，本课程还有一个重要内容，就是介绍机械制造、使用和维修中必然涉及的有关互换性、标准化的概念、含义和意义，以及几何要素检测中的一些基本知识，如长度、角度单位及其传递系统、计量器具、测量方法的基本概念，量规的设计和量具的选择，测量误差的概念和测量数据处理的基本方法，齿轮、轴承、螺纹连接、键连接的检测参数及检测方法等。

本书严格按照教学大纲进行编写，全面系统地阐述了尺寸公差、几何公差与测量的基本知识，各种典型零件精度设计的基本原理和方法，以及检测原理、方法。本书主要有以下几个特点：

1. 采用最新国家标准。本书所引用的标准全部为最新国家标准，标准内容齐全完整。

2. 紧密结合教学大纲，融入了编者多年的教学经验，将理论教学部分和计量测试实践部分有机结合，注重学生能力和素质的培养。

3. 内容新颖齐全，资料丰富，阐述简明扼要，结构层次分明。

4. 全书每章均有自测题，以方便学生掌握要点，培养思考能力。

本书由辽宁石油化工大学丛树岩和龚雪编写。其中，丛树岩编写了第 2、3、5、6 章，龚雪编写了第 1、4、7、8、9、10、11 章。

限于编者水平，书中难免有不足和错误之处，恳切希望广大读者批评指正。

编　者

目　　录

第1章 绪　　论

1.1　课程的性质与任务

互换性与技术测量是机械类专业的一门技术基础课，是从事机械设计、机械制造的专业基础知识，更是从基础课程过渡到专业课程的纽带。

本课程的主要任务：通过本课程的学习，使学生掌握互换性与技术测量的基本原理，掌握各种结合件公差与配合标准的基础知识。在机械设计、机械制造、设备维修等工作中能够合理应用公差与配合标准，能进行一般的技术测量。通过学习，使学生初步具备运用互换性与技术测量知识分析和解决问题的能力，为学习后续课程打下必要的基础。

1.2　互换性与公差标准

1.2.1　互换性

在工业及日常生活中到处都能遇到互换性问题。例如：机器上丢了一个螺钉，可以按相同的规格装上一个；灯泡坏了，可以换个新的；自行车、缝纫机、钟表的零部件磨损了，也可以换个相同规格的新的零部件，就能满足使用要求。互换性是机器和仪器制造行业中产品设计和制造的重要原则。

1. 基本定义

所谓互换性是指：同一规格的一批零部件，任取其一，不需任何挑选和修理就能装在机器上，并能满足其使用功能要求。

在设计方面，零部件具有互换性，就可以最大限度地采用标准件、通用件和标准部件，大大简化了绘图和计算工作，缩短了设计周期，有利于计算机辅助设计和产品品种的多样化。

在制造方面，互换性有利于组织专业化生产，有利于采用先进工艺和高效率的专用设备，有利于用计算机辅助制造，有利于实现加工过程和装配过程机械化、自动化，从而提高劳动生产率和产品质量，降低生产成本。

在使用和维修方面，具有互换性的零部件在磨损及损坏后可及时更换，因而

减少了机器的维修时间和费用，保证机器连续运转，从而提高机器的使用价值。

2. 互换性的分类

机器和仪器制造业中的互换性，通常包括几何参数（如尺寸）和力学性能（如硬度、强度）的互换。本课程仅讨论几何参数的互换。

所谓几何参数互换，主要包括零部件的尺寸、几何形状、相互的位置关系以及表面粗糙度等参数的互换。

互换性按其互换程度，可分为完全互换和不完全互换。若一批零部件在装配时，不需要挑选、调整和修配，装配后即能满足预定的要求，这些零部件属于完全互换。零部件在加工完后，通过测量将零件按实际尺寸大小分为若干组，使各组组内零件间实际尺寸的差别减小，装配时按对应组进行。这样，既可保证装配精度和使用要求，又能解决加工上的困难，降低成本。但此时，仅组内零件可以互换，组与组之间不可互换，故称为不完全互换。装配时需要进行挑选或调整的零部件也属于不完全互换。

1.2.2 标准及标准化

所谓标准，就是指为了取得国民经济的最佳效果，对需要协调统一的具有重复特征的物品（如产品、零部件等）和概念（如术语、规则、方法、代号、量值等），在总结科学试验和生产实践的基础上，由有关方面协调制订，经主管部门批准后，在一定范围内作为活动的共同准则和依据。

所谓标准化，就是指标准的制订、发布和贯彻实施的全部活动过程。

按照标准化对象的特性，标准可分为基础标准、产品标准、方法标准、安全标准、卫生标准等。

对需要在全国范围内统一的技术要求，应当制订国家标准，代号为 GB。对没有国家标准而又需要在全国某个行业范围内统一的技术要求，可制订行业标准，如机械行业标准（JB）等。对没有国家标准和行业标准而又需要在某个范围内统一的技术要求，可制订地方标准或企业标准，它们的代号分别为 DB、QB。

为使产品的参数选择能遵守统一的规律，必须对各种技术参数的数值做出统一规定。《优先数和优先数系》国家标准（GB/T 321—2005）就是其中最重要的一个标准，要求工业产品技术参数应尽可能采用它。

优先数系是由公比为 $\sqrt[5]{10}$、$\sqrt[10]{10}$、$\sqrt[20]{10}$、$\sqrt[40]{10}$、$\sqrt[80]{10}$，且项值中含有 10 的整数幂的理论等比数列导出的一组近似等比的数列。各数列分别用符号 R5、R10、R20、R40、R80 表示，分别称为 R5 系列、R10 系列、R20 系列、R40 系列、R80 系列。

R5 系列是以 $\sqrt[5]{10} \approx 1.60$ 为公比形成的数系；

R10 系列是以 $\sqrt[10]{10} \approx 1.25$ 为公比形成的数系；

R20 系列是以$\sqrt[20]{10}\approx1.12$ 为公比形成的数系；

R40 系列是以$\sqrt[40]{10}\approx1.06$ 为公比形成的数系；

R80 系列是以$\sqrt[80]{10}\approx1.03$ 为公比形成的数系。

1.3 加工误差、公差及检测

允许零件几何参数的变动量称为公差。工件的误差在公差范围内，为合格件；超出了公差范围，为不合格件。

完工后的零件是否满足公差要求，要通过检测加以判断。检测包含检验与测量。几何量的检验是指确定零件的几何参数是否在规定的极限范围内，并做出合格性判断，而不必得出被测量的具体数值；测量是将被测量与作为计量单位的标准量进行比较，以确定被测量的具体数值的过程。

自测习题一

1. 什么是互换性？互换性的优越性有哪些？
2. 互换性的分类有哪些？完全互换和不完全互换有何区别？
3. 什么是标准和标准化？
4. 为何要采用优先数系？R5、R10、R20、R40 系列各代表什么？
5. 误差、公差、检测、标准化与互换性有什么关系？

第2章 孔与轴的极限与配合

极限与配合标准（GB/T 1800—2009）是产品几何技术规范中应用最为广泛、最重要的基础性标准。孔与轴的极限与配合是互换性的基础。合理选择孔与轴的极限与配合对机械产品的性能和使用寿命有着重要影响，在机械工程中具有相当重要的作用。该标准不仅是机械工业各部门进行产品设计、工艺设计和制订其他标准的基础，也是广泛组织协作和专业化生产的重要依据，对我国制造业的高速发展起着举足轻重的作用。

2.1 极限与配合的基本概念

2.1.1 有关尺寸的基本术语

1. 尺寸要素

由一定大小的线性尺寸或角度尺寸确定的几何形状。

2. 实际（组成）要素

由接近实际（组成）要素所限定的工件实际表面的组成要素部分。

3. 提取组成要素

按规定方法，由实际（组成）要素提取有限数目的点所形成的实际（组成）要素的近似替代。

4. 拟合组成要素

按规定方法，由提取组成要素形成的并具有理想形状的组成要素。

5. 孔与轴

孔：通常指工件的圆柱形内尺寸要素，也包括非圆柱形的内尺寸要素（由二平行平面或切面形成的包容面）。在基孔制配合中选作基准的孔也称为基准孔，即下极限偏差为零的孔。

轴：通常指工件的圆柱形外尺寸要素，也包括非圆柱形的外尺寸要素（由二平行平面或切面形成的被包容面）。在基轴制配合中选作基准的轴也称为基准轴，即上极限偏差为零的轴。

图2-1中，由 D_1 和 D_2 各尺寸确定的包容面，均称为孔；由 d_1、d_2 和 d_3 各尺寸确定的被包容面，均称为轴；而由 L_1 和 L_2 各尺寸确定的表面，既不是孔也不是轴。

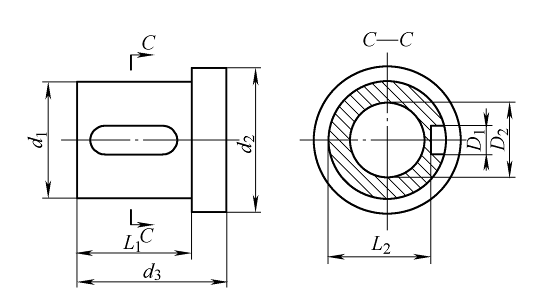


图 2-1 孔和轴

6. 尺寸

以特定单位表示线性尺寸值的数值。线性尺寸值可以是长度值，包括直径、半径、宽度、深度、高度和中心距等，也可以是角度值。线性尺寸值通常以毫米（mm）为单位，角度单位有：度（°）、分（′）、秒（″）、弧度（rad）。

7. 公称尺寸

由图样规范确定的理想形状要素的尺寸，如图 2-1 所示。通过公称尺寸及上、下极限偏差可计算出极限尺寸。公称尺寸可以是一个整数值或一个小数值，例如 32、15、875、0. 5、…。设计者可以根据强度、刚度等要求，通过理论计算或工程实验确定公称尺寸的大小。为实现产品设计的三化要求（标准化、系列化和通用化）或缩减定值刀具、量具、夹具等的规格数量，公称尺寸应根据优先数系进行圆整或选用标准数值。

8. 实际尺寸

通过测量获得的尺寸由于不可避免地存在测量误差，所以实际尺寸并非被测尺寸的真值。由于被测工件上存在着几何误差，即使是对同一个工件的同一表面进行测量，所得到的实际尺寸也往往是不同的。GB/T 1800. 1—2009 中，用“实际组成要素”、“提取组成要素的局部尺寸”代替“实际尺寸”和“局部实际尺寸”等概念。

9. 提取组成要素的局部尺寸

一切提取组成要素上两对应点之间距离的统称。为方便起见，可将提取组成要素的局部尺寸简称为提取要素的局部尺寸。

提取圆柱面的局部尺寸：要素上两对应点之间的距离。其中，两对应点之间的连线通过拟合圆圆心；横截面垂直于由提取表面得到的拟合圆柱面的轴线。

提取两平行表面的局部尺寸：两平行对应提取表面上两对应点之间的距离。其中，所有对应点的连线均垂直于拟合中心平面；拟合中心平面是由两平行提取表面得到的两拟合平行平面的中心平面（两拟合平行平面之间的距离可能与公称距离不同）。

10. 极限尺寸

尺寸要素允许的尺寸的两个极端。提取组成要素的局部尺寸应位于其中，也

可达到极限尺寸。极限尺寸包括上极限尺寸与下极限尺寸。

上极限尺寸：尺寸要素允许的最大尺寸。上极限尺寸在以前被称为最大极限尺寸。

下极限尺寸：尺寸要素允许的最小尺寸。下极限尺寸在以前被称为最小极限尺寸（见图2-2）。

图2-2 公称尺寸、上极限尺寸和下极限尺寸

2.1.2 有关公差与偏差的基本术语

1. 偏差

某一尺寸减其公称尺寸所得的代数差。

2. 极限偏差

极限偏差包括上极限偏差和下极限偏差。

上极限偏差：上极限尺寸减去其公称尺寸所得的代数值。下极限偏差：下极限尺寸减去其公称尺寸所得的代数值。

上极限偏差代号，对孔用大写字母“ES”表示，对轴用小写字母“es”表示。

下极限偏差代号，对孔用大写字母“EI”表示，对轴用小写字母“ei”表示。

3. 基本偏差

在极限与配合国标中，确定公差带相对零线位置的那个极限偏差。它可以是上极限偏差或下极限偏差，一般为靠近零线的那个偏差。

4. 尺寸公差（简称公差）

允许尺寸的变动量。尺寸公差等于上极限尺寸与下极限尺寸之差，或上极限偏差与下极限偏差之差。尺寸公差是一个没有符号的绝对值。

$$T_H = D_{max} - D_{min} = ES - EI \tag{2-1}$$

$$T_S = d_{max} - d_{min} = es - ei \tag{2-2}$$

式中 T_H——孔公差；

T_S——轴公差；

D_{max}，d_{max}——孔与轴的上极限尺寸；

D_{min}，d_{min}——孔与轴的下极限尺寸。

5. 标准公差

在极限与配合国标中，用以确定公差带大小的任一公差，称为标准公差，用字母“IT”表示。

6. 零线

在极限与配合图解中，表示公称尺寸的一条直线，以其为基准确定偏差和公差。通常，零线沿水平方向绘制，正偏差位于零线的上方，负偏差位于零线的下方。

7. 公差带

在公差带图解中，由代表上极限偏差和下极限偏差或上极限尺寸和下极限尺

寸的两条直线所限定的一个区域。

公差带由公差大小和其相对零线的位置这两个参数来确定。公差带的大小通常由标准公差来确定；公差带相对零线的位置由基本偏差来确定。

由于尺寸是毫米级，而公差一般是微米级，所以公差数值比公称尺寸的数值小得多。为了表示尺寸、极限偏差和公差之间的关系，采用简单的公差带图表示，用尺寸公差带的高度和相互位置表示公差大小和配合性质（见图 2-3）。图 2-4 所示为本极限与配合制所确定的主要术语。

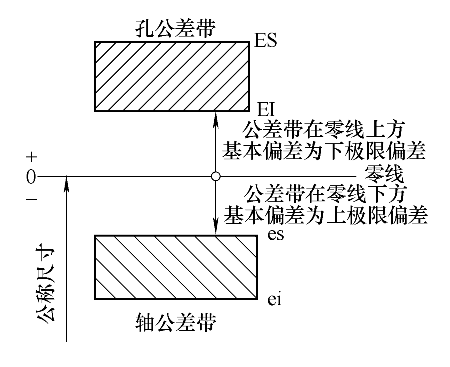


图 2-3　公差带与基本偏差示意图

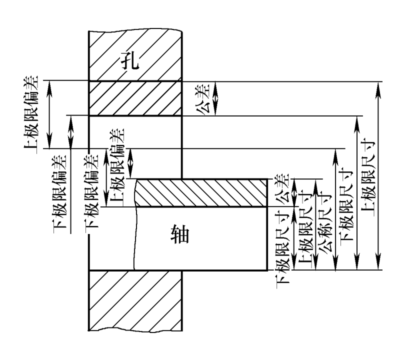


图 2-4　术语图解

2.1.3　有关配合的基本术语

1. 配合

配合是指公称尺寸相同并且相互结合的孔和轴公差带之间的关系。

配合制：同一极限制的孔和轴组成的一种配合制度。国家标准对配合规定了基孔制配合与基轴制配合两种基准制。

基孔制配合：基本偏差为一定的孔的公差带，与不同基本偏差的轴的公差带形成各种配合的一种制度。在极限与配合国标中，是指孔的下极限尺寸与公称尺寸相等、孔的下极限偏差为零的一种配合制（见图 2-5）。图中的水平实线代表孔或轴的基本偏差，虚线代表另一个极限偏差，表示孔与轴之间可能的不同组合与它们的公差等级有关。

基轴制配合：基本偏差为一定的轴的公差带，与不同基本偏差的孔的公差带形成各种配合的一种制度。在极限与配合国标中，是轴的上极限尺寸与公称尺寸相等、轴的上极限偏差为零的一种配合制（见图 2-6）。

2. 间隙与过盈

孔的尺寸减去相配合的轴的尺寸之差为正即为间隙；孔的尺寸减去相配合的轴的尺寸之差为负即为过盈（见图 2-7）。

3. 间隙配合

孔的公差带在轴的公差带之上，保证具有间隙的配合（包括最小间隙等于

零），称为间隙配合（见图 2-8）。

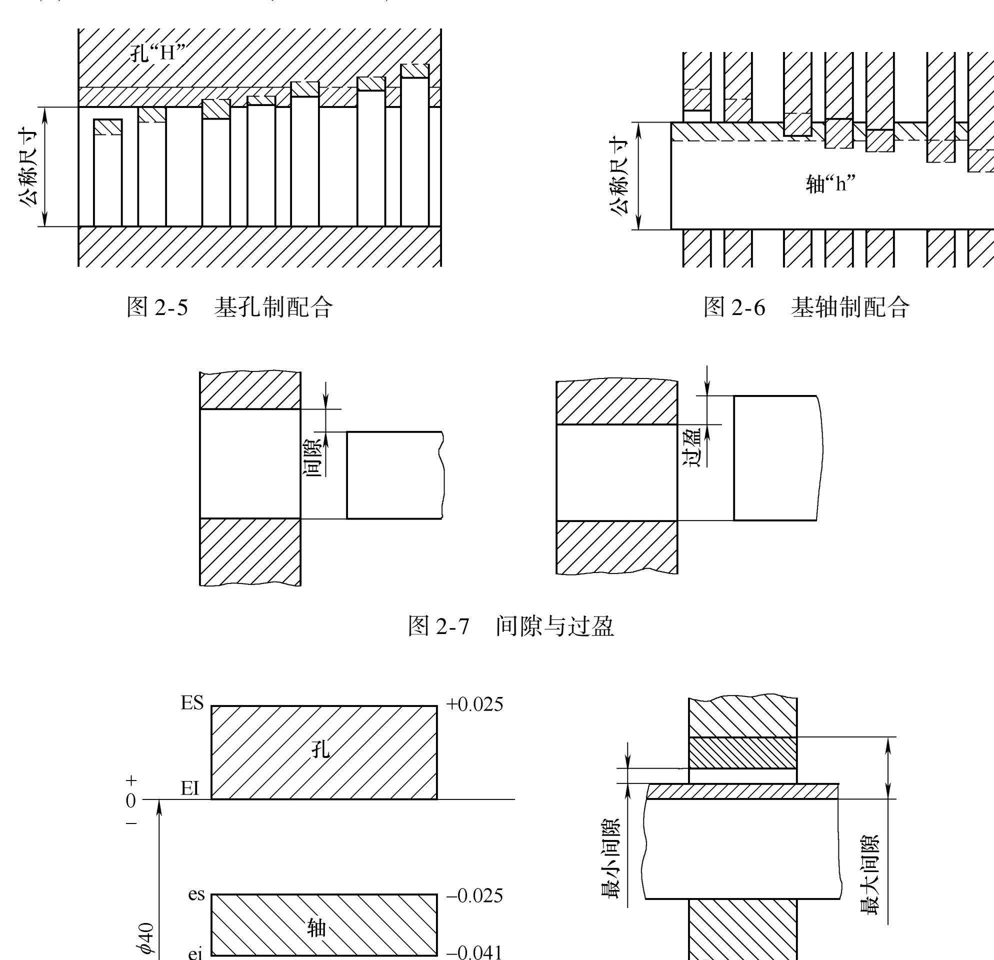


图 2-5　基孔制配合

图 2-6　基轴制配合

图 2-7　间隙与过盈

图 2-8　间隙配合

a）间隙配合公差带图　b）间隙配合示意图

由于孔、轴的尺寸可以在各自的公差带内变动，所以，实际间隙的大小随着孔和轴的实际尺寸的变化而变化。

最大间隙（X_{max}）等于孔的上极限尺寸减轴的下极限尺寸，或等于孔的上极限偏差减轴的下极限偏差。

最小间隙（X_{min}）等于孔的下极限尺寸减轴的上极限尺寸，或等于孔的下极限偏差减轴的上极限偏差。

配合公差（T_f）：允许间隙的变动量，它等于最大间隙（X_{max}）与最小间隙（X_{min}）之差，或等于孔公差（T_H）与轴公差（T_S）之和。

【**例 2-1**】如图 2-8 所示，$\phi40^{+0.025}_{0}$ mm 的孔与 $\phi40^{-0.025}_{-0.041}$ mm 的轴形成基孔制间隙配合的各种计算见表 2-1。

表 2-1 基孔制间隙配合的计算 （单位：mm）

计 算 项 目	孔	轴
公称尺寸	40	40
上极限偏差	ES = +0.025	es = −0.025（基本偏差）
下极限偏差	EI = 0（基本偏差）	ei = −0.041
上极限尺寸	40.025	39.975
下极限尺寸	40.000	39.959
标准公差	$T_H = 0.025 - 0 = 0.025$	$T_S = -0.025 + 0.041 = 0.016$
最大间隙	$X_{max} = ES - ei = 0.025 + 0.041 = 0.066$	
最小间隙	$X_{min} = EI - es = 0 + 0.025 = 0.025$	
配合公差（允许间隙的变动量）	$T_f = X_{max} - X_{min} = 0.066 - 0.025 = 0.041$ $T_f = (ES - ei) - (EI - es) = (ES - EI) + (es - ei) = T_H + T_S$	

4. 过盈配合

孔的公差带在轴的公差带之下，保证具有过盈的配合（包括最小过盈等于零），称为过盈配合（见图 2-9）。

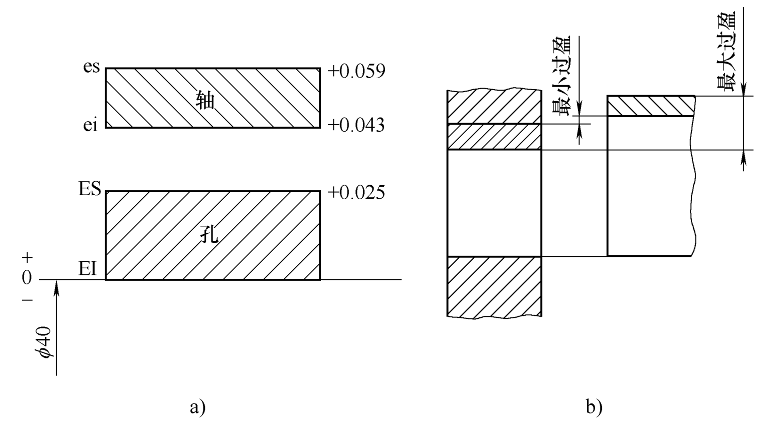


图 2-9 过盈配合

a）过盈配合公差带图 b）过盈配合的示意图

同理，孔、轴的尺寸亦可以在各自的公差带内变动，所以，实际过盈的大小也随着孔和轴的实际尺寸的变化而变化。

最大过盈（Y_{max}）等于孔的下极限尺寸减轴的上极限尺寸，或等于孔的下极限偏差减轴的上极限偏差。

最小过盈（Y_{min}）等于孔的上极限尺寸减轴的下极限尺寸，或等于孔的上极限

偏差减轴的下极限偏差。

配合公差（T_f）：允许过盈的变动量，它等于最小过盈（Y_{min}）与最大过盈（Y_{max}）之差，或等于孔公差（T_H）与轴公差（T_S）之和。

【例 2-2】 如图 2-9 所示，$\phi40^{+0.025}_{0}$mm 的孔与 $\phi40^{+0.059}_{+0.043}$mm 的轴形成基孔制过盈配合的各种计算见表 2-2。

表 2-2　基孔制过盈配合的各种计算　　（单位：mm）

计算项目	孔	轴
公称尺寸	40	40
上极限偏差	ES = +0.025	es = +0.059
下极限偏差	EI = 0（基本偏差）	ei = +0.043（基本偏差）
上极限尺寸	40.025	40.059
下极限尺寸	40.000	40.043
标准公差	$T_H = 0.025 - 0 = 0.025$	$T_S = 0.059 - 0.043 = 0.016$
最大过盈	$Y_{max} = EI - es = 0 - 0.059 = -0.059$	
最小过盈	$Y_{min} = ES - ei = 0.025 - 0.043 = -0.018$	
配合公差（允许间隙的变动量）	$T_f = Y_{min} - Y_{max} = -0.018 + 0.059 = 0.041$ $T_f = (ES - ei) - (EI - es) = (ES - EI) + (es - ei) = T_H + T_S$	

5. 过渡配合

孔的公差带与轴的公差带相互交叠，任取一对孔和轴配合，可能具有间隙，也可能具有过盈的配合，称为过渡配合（见图 2-10）。

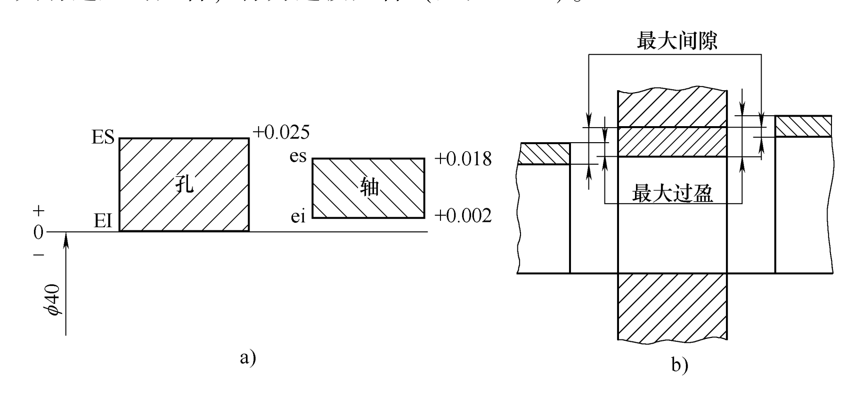


图 2-10 过渡配合

a）过渡配合公差带图　b）过渡配合的示意图

同理，孔、轴的尺寸亦可以在各自的公差带内变动，所以，实际间隙或过盈的大小也是随着孔和轴的实际尺寸的变化而变化。

最大间隙（X_{max}）等于孔的上极限尺寸减轴的下极限尺寸，或等于孔的上极

限偏差减轴的下极限偏差。

最大过盈（Y_{max}）等于孔的下极限尺寸减轴的上极限尺寸，或等于孔的下极限偏差减轴的上极限偏差。

配合公差（T_f）等于最大间隙（X_{max}）与最大过盈（Y_{max}）之差，或等于孔公差（T_H）与轴公差（T_S）之和。

【例 2-3】 如图 2-10 所示，$\phi40^{+0.025}_{0}$mm 的孔与 $\phi40^{+0.018}_{+0.002}$mm 的轴形成基孔制过渡配合的各种计算见表 2-3。

表 2-3　基孔制过渡配合的计算　　（单位：mm）

计 算 项 目	孔	轴
公称尺寸	40	40
上极限偏差	ES = +0.025	es = +0.018
下极限偏差	EI = 0（基本偏差）	ei = +0.002（基本偏差）
上极限尺寸	40.025	40.018
下极限尺寸	40.000	40.002
标准公差	$T_H = 0.025 - 0 = 0.025$	$T_S = 0.018 - 0.002 = 0.016$
最大间隙	$X_{max} = ES - ei = 0.025 - 0.002 = 0.023$	
最大过盈	$Y_{max} = EI - es = 0 - 0.018 = -0.018$	
配合公差 （允许间隙的变动量）	$T_f = X_{max} - Y_{max} = 0.023 + 0.018 = 0.041$ $T_f = (ES - ei) - (EI - es) = (ES - EI) + (es - ei) = T_H + T_S$	

2.1.4　公差、偏差与配合的代号及表示

1. 标准公差等级代号

标准公差等级代号用符号 IT 和数字组成，例如：IT7。当其与代表基本偏差的字母一起组成公差带时，省略 IT 字母，如 h7、H8、f7、D10 等。

2. 基本偏差代号

对于孔的基本偏差代号，用大写字母 A、B、C、…、ZA、ZB、ZC 表示；

对于轴的基本偏差代号，用小写字母 a、b、c、…、za、zb、zc 表示（见图 2-11）。

孔与轴各有 28 个基本偏差，其中，基本偏差 H 代表基准孔，h 代表基准轴。为避免混淆，不用下列字母：I，i，L，l，O，o，Q，q，W，w。

3. 公差带的表示

公差带用基本偏差的字母和公差等级数字表示。例如：H7 为孔公差带；h7 为轴公差带。

4. 注公差尺寸的表示

注公差的尺寸用公称尺寸后跟所要求的公差带或/和对应的偏差值表示。例如：

32H7　　　　80js10　　　　100g6

$100_{-0.034}^{-0.012}$　　　　$100g6_{-0.034}^{-0.012}$

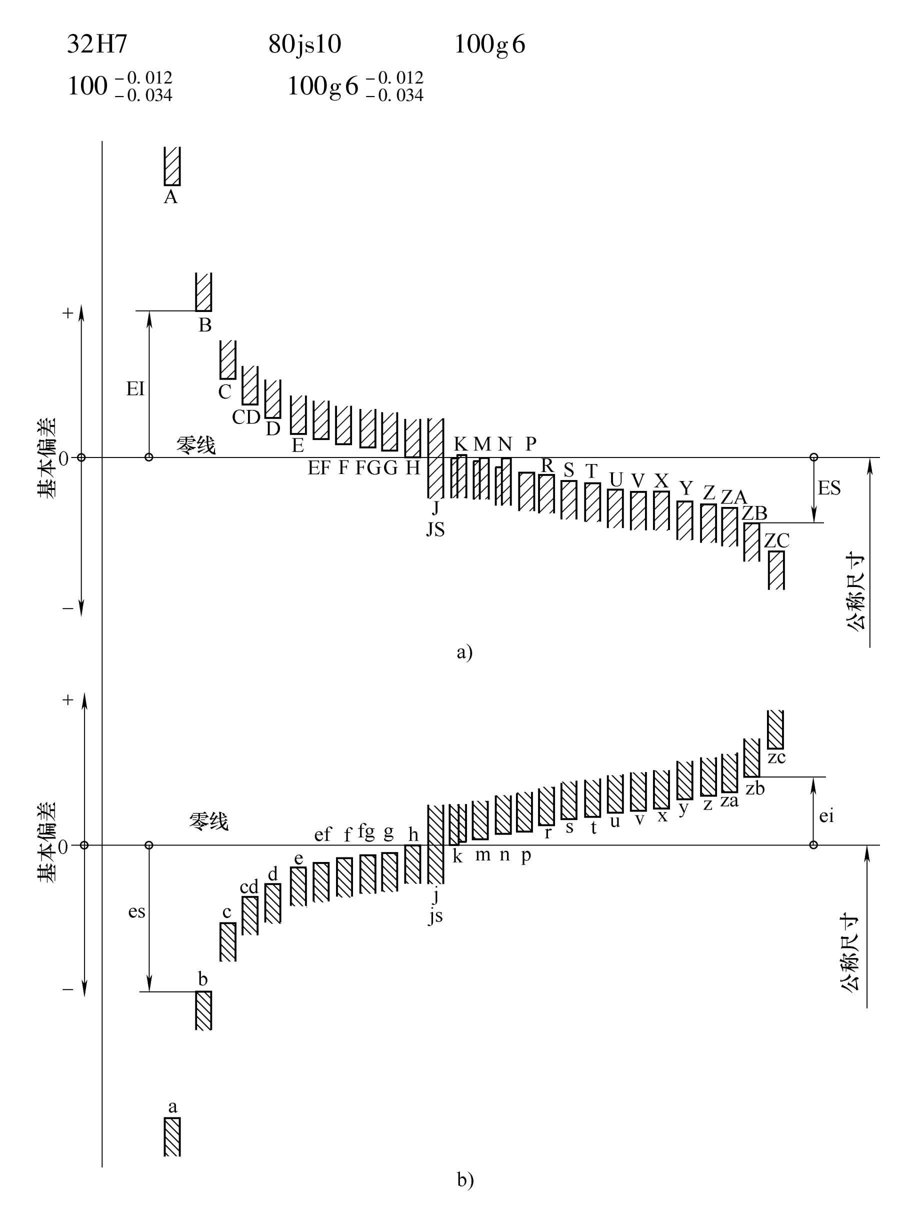


图 2-11　基本偏差系列示意图

a）孔　b）轴

5. 配合的表示

配合用相同的公称尺寸后跟孔、轴公差带表示。孔、轴公差带写成分数形式，分子为孔公差带，分母为轴公差带。例如：

$$52H7/g6 \quad 或 \quad 52\frac{H7}{g6}$$

2.2 极限与配合标准化

极限与配合标准化是指孔、轴各自公差带的大小、位置的标准化及其所形成各种配合的标准化。标准公差系列使公差带大小标准化，基本偏差系列使公差带位置标准化。

2.2.1 标准公差系列

标准公差“IT”是指 GB/T 1800—2009《产品几何技术规范（GPS）极限与配合》标准制中，所规定的任一公差，用来确定公差带的大小。字母“IT”为“国际公差”的英文缩略语。

极限与配合在公称尺寸至500mm 内规定了 IT01、IT0、IT1、…、IT18 共 20 个标准公差等级；公称尺寸在 >500 ~ 3150mm 内规定了 IT1 ~ IT18 共 18 个标准公差等级。在标准公差等级当中，IT01 精度最高（公差值最小），IT18 精度最低（公差值最大）。每一级标准公差数值都是通过计算得来的。标准公差等级是确定尺寸精确程度的参数，同一公差等级（例如 IT7）对所有公称尺寸的一组公差被认为具有同等精确程度。

1. 公称尺寸至 500mm 的标准公差的计算

（1）IT01 ~ IT4 标准公差的计算　等级 IT01、IT0 和 IT1 的标准公差数值由表 2-4 给出的公式计算。对等级 IT2、IT3 和 IT4 没有给出计算公式，其标准公差数值在 IT1 和 IT5 的数值之间大致按几何级数递增。

表 2-4　IT01、IT0 及 IT1 的标准公差计算公式　　（单位：μm）

标准公差等级	计 算 公 式
IT01	$0.3 + 0.008D$
IT0	$0.5 + 0.012D$
IT1	$0.8 + 0.02D$

注：式中 D 为公称尺寸段的几何平均值，单位为 mm。

（2）IT5 ~ IT18 标准公差因子的计算　等级 IT5 ~ IT18 的标准公差数值作为标准公差因子 i 的函数，由表 2-5 所列计算公式求得。标准公差因子 i 由下式计算：

$$i = 0.45\sqrt[3]{D} + 0.001D \tag{2-3}$$

式中　i——单位为 μm；

D——公称尺寸段的几何平均值，单位为 mm。

式（2-3）表明，标准公差因子 i 是公称尺寸的函数。式中的第一项表示标准公差与公称尺寸关系符合立方抛物线的规律，主要是考虑加工误差对标准公差的影响；第二项是考虑补偿与直径成正比的误差（主要是测量误差）。

2. 公称尺寸在 >500 ~ 3150mm 之间的标准公差的计算

等级 IT1 ~ IT18 的标准公差数值作为标准公差因子 I 的函数，由表 2-5 所列计算公式求得。标准公差因子 I 由下式计算：

$$I = 0.004D + 2.1 \tag{2-4}$$

式中 I——单位为 μm；

D——公称尺寸段的几何平均值，单位为 mm。

由表 2-5 可见，国家标准规定的标准公差是由公差等级系数 a 与标准公差因子 i（或 I）的乘积值来决定的，即公差 T 按下式计算：

$$T = ai \quad 或 \quad T = aI \tag{2-5}$$

在公称尺寸一定的情况下，公差等级系数是决定标准公差的唯一参数，由表 2-5中可以看出，从 IT6 ~ IT18 级，公差等级系数按 R5 优先数系增加，公比 $q_5 \approx 1.6$，即每增 5 个等级，标准公差增加至 10 倍。

表 2-5 IT1 ~ IT18 的标准公差计算公式

公称尺寸/mm		标准公差等级																	
		IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
大于	至	标准公差计算公式/μm																	
—	500	—	—	—	—	$7i$	$10i$	$16i$	$25i$	$40i$	$64i$	$100i$	$160i$	$250i$	$400i$	$640i$	$1000i$	$1600i$	$2500i$
500	3150	$2I$	$2.7I$	$3.7I$	$5I$	$7I$	$10I$	$16I$	$25I$	$40I$	$64I$	$100I$	$160I$	$250I$	$400I$	$640I$	$1000I$	$1600I$	$2500I$

注：1. 公称尺寸至 500mm 的 IT1 ~ IT4 的标准公差计算见表 2-4。
2. 从 IT6 起，其规律为：每增 5 个等级，标准公差增加至 10 倍，也可用于延伸超过 IT18 的公差等级。

计算得到的公差值，还需要按规定的标准公差值尾数的修约规则进行修约。公称尺寸至 3150mm 的各级标准公差数值见表 2-6，生产中一般通过查表的方法得到标准公差值。

表 2-6 公称尺寸至 3150mm 的标准公差数值

公称尺寸/mm		标准公差等级																	
		IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
大于	至	/μm												/mm					
	3	0.8	1.2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	0.14	0.25	0.4	0.6	1	1.4
3	6	1	1.5	2.5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	0.18	0.3	0.48	0.75	1.2	1.8
6	10	1	1.5	2.5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	0.22	0.36	0.58	0.9	1.5	2.2
10	18	1.2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	0.27	0.43	0.7	1.1	1.8	2.7
18	30	1.5	2.5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	0.33	0.52	0.84	1.3	2.1	3.3
30	50	1.5	2.5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	0.39	0.62	1	1.6	2.5	3.9
50	80	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	0.46	0.74	1.2	1.9	3	4.6

（续）

公称尺寸/mm		标准公差等级																	
		IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
大于	至	/μm												/mm					
80	120	2.5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	0.54	0.87	1.4	2.2	3.5	5.4
120	180	3.5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400	0.63	1	1.6	2.5	4	6.3
180	250	4.5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	460	0.72	1.15	1.85	2.9	4.6	7.2
250	315	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	0.81	1.3	2.1	3.2	5.2	8.1
315	400	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570	0.89	1.4	2.3	3.6	5.7	8.9
400	500	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	0.97	1.55	2.5	4	6.3	9.7
500	630	9	11	16	22	30	44	70	110	175	280	440	700	1.1	1.75	2.8	4.4	7	11
630	800	10	13	18	25	35	50	80	125	200	320	500	800	1.25	2	3.2	5	8	12.5
800	1000	11	15	21	29	40	56	90	140	230	360	560	900	1.4	2.3	3.6	5.6	9	14
1000	1250	13	18	24	34	46	66	105	165	260	420	660	1050	1.65	2.6	4.2	6.6	10.5	16.5
1250	1600	15	21	29	40	54	78	125	195	310	500	780	1250	1.95	3.1	5	7.8	12.5	19.5
1600	2000	18	25	35	48	65	92	150	230	370	600	920	1500	2.3	3.7	6	9.2	15	23
2000	2500	22	30	41	57	77	110	175	280	440	700	1100	1750	2.8	4.4	7	11	17.5	28
2500	3150	26	36	50	69	93	135	210	330	540	860	1350	2100	3.3	5.4	8.6	13.5	21	33

3. 公称尺寸分段

编制标准公差数值表时，若按式（2-5），每一个公称尺寸都有一个对应的公差值，生产实践中公称尺寸很多，造成计算得到的公差值繁多，给工程生产造成困难。为了减少公差数目，统一公差值，简化公差表格，便于生产应用，国家标准对公称尺寸进行了分段。尺寸分段以后，在同一个尺寸段内的所有公称尺寸，在公差等级相同的情况下，规定相同的标准公差。

公称尺寸分主段落和中间段落规定于表2-7。标准公差和基本偏差是按表中的公称尺寸段计算的。中间段落仅用于计算尺寸至500mm的轴的基本偏差a～c及r～zc或孔的基本偏差A～C及R～ZC，或计算尺寸大于500～3150mm的轴的基本偏差r～u及孔的基本偏差R～U。

在计算各公称尺寸段的标准公差时，公式中的D为每一尺寸段中首尾两个尺寸（D_1和D_2）的几何平均值，即

$$D = \sqrt{D_1 D_2} \tag{2-6}$$

对≤3mm的公称尺寸段，用1mm和3mm的几何平均值$D=1.732$mm来计算标准公差和基本偏差。

表 2-7　公称尺寸分段　（单位：mm）

主段落		中间段落		主段落		中间段落	
大于	至	大于	至	大于	至	大于	至
	3	无细分段		250	315	250 280	280 315
3	6			315	400	315 355	355 400
6	10						
10	18	10 14	14 18	400	500	400 450	450 500
18	30	18 24	24 30	500	680	500 560	560 630
30	50	30 40	40 50	630	800	630 710	710 800
50	80	50 65	65 80	800	1000	800 900	900 1000
80	120	80 100	100 120	1000	1250	1000 1120	1120 1250
120	180	120 140 160	140 160 180	1250	1600	1250 1100	1400 1600
				1000	2000	1600 1800	1800 2000
180	250	180 200 225	200 225 250	2000	2500	2000 2240	2240 2500
				2500	3150	2500 2800	2800 3150

2.2.2　基本偏差系列

基本偏差是确定公差带相对零线位置的那个极限偏差。它可以是上极限偏差或下极限偏差，一般为靠近零线的那个偏差。当公差带位于零线上方时，基本偏差是下极限偏差；当公差带位于零线下方时，基本偏差是上极限偏差。基本偏差的大小能决定孔和轴配合的松紧程度，是国家标准公差带位置标准化的重要指标。

基本偏差系列见图 2-11，孔与轴各有 28 种基本偏差。其中，轴的基本偏差代号 a ~ h 为上极限偏差，k ~ zc 为下极限偏差；孔的基本偏差代号 A ~ H 为下极限偏差，K ~ ZC 为上极限偏差。

基本偏差系列图中绘出的公差带一端是基本偏差，未绘出的另一端的位置，取决于公差等级和基本偏差的组合。若上极限偏差未绘出，则其值可以通过下式计算：

$$\mathrm{ES} = \mathrm{EI} + T_{\mathrm{H}} \quad 或 \quad \mathrm{es} = \mathrm{ei} + T_{\mathrm{S}} \tag{2-7}$$

若下极限偏差未绘出，则其值可以通过下式计算：

$$EI = ES - T_H \quad 或 \quad ei = es - T_S \tag{2-8}$$

1. 轴的基本偏差

轴的基本偏差是以基孔制配合为基础，根据配合要求，依据生产实践和大量试验的统计分析结果，整理出一系列公式而计算出来的。计算公式见表 2-8。

表 2-8 轴和孔的基本偏差计算公式

公称尺寸/mm		轴			公式	孔			公称尺寸/mm	
大于	至	基本偏差	符号	极限偏差		极限偏差	符号	基本偏差	大于	至
1	120	a	-	es	$265 + 1.3D$	EI	+	A	1	120
120	500				$3.5D$				120	500
1	160	b	-	es	$\approx 140 + 0.85D$	EI	+	B	1	160
160	500				$\approx 1.8D$				160	500
0	40	c	-	es	$52D^{0.2}$	EI	+	C	0	40
40	500				$95 + 0.8D$				40	500
0	10	cd	-	es	C、c 和 D、d 值的几何平均值	EI	+	CD	0	10
0	3150	d	-	es	$16D^{0.44}$	EI	+	D	0	3150
0	3150	e	-	es	$11D^{0.41}$	EI	+	E	0	3150
0	10	ef	-	es	E、e 和 F、f 值的几何平均值	EI	+	EF	0	10
0	3150	f	-	es	$5.5D^{0.41}$	EI	+	F	0	3150
0	10	fg	-	es	F、f 和 G、g 值的几何平均值	EI	+	FG	0	10
0	3150	g	-	es	$2.5D^{0.34}$	EI	+	G	0	3150
0	3150	h	无符号	es	偏差 = 0	EI	无符号	H	0	3150
0	500	j			无公式			J	0	500
0	3150	js	+ -	es ei	$0.5\mathrm{IT}n$	EI ES	+ -	JS	0	3150
0	500	K	+	ei	$0.6\sqrt[3]{D}$	ES	-	K	0	500
500	3150		无符号		偏差 = 0		无符号		500	3150
0	500	m	+	ei	IT7 - IT6	ES	-	M	0	500
500	3150				$0.024D + 12.6$				500	3150
0	500	n	+	ei	$5D^{0.34}$	ES	-	N	0	500
500	3150				$0.04D + 21$				500	3150
0	500	P	+	ei	IT7 + (0 ~ 5)	ES	-	P	0	500
500	3150				$0.072D + 37.8$				500	3150

（续）

公称尺寸/mm		轴			公式	孔			公称尺寸/mm	
大于	至	基本偏差	符号	极限偏差		极限偏差	符号	基本偏差	大于	至
0	3150	r	+	ei	P、p 和 S、s 值的几何平均值	ES	−	R	0	3150
0	50	s	+	ei	IT8 + (1 ~ 4)	ES	−	S	0	50
50	3150				IT7 + 0.4D				50	3150
24	3150	t	+	ei	IT7 + 0.63D	ES	−	T	24	3150
0	3150	u	+	ei	IT7 + D	ES	−	U	0	3150
14	500	v	+	ei	IT7 + 1.25D	ES	−	V	14	500
0	500	x	+	ei	IT7 + 1.6D	ES	−	X	0	500
18	500	y	+	ei	IT7 + 2D	ES	−	Y	18	500
0	500	z	+	ei	IT7 + 2.5D	ES	−	Z	0	500
0	500	za	+	ei	IT8 + 3.15D	ES	−	ZA	0	500
0	500	zb	+	ei	IT9 + 4D	ES	−	ZB	0	500
0	500	zc	+	ei	IT10 + 5D	ES	−	ZC	0	500

注：1. 公式中 D 是公称尺寸段的几何平均值，单位为 mm；基本偏差的计算结果单位为 μm。
2. 公称尺寸至500mm 轴的基本偏差 k 的计算公式仅适用于标准公差等级 IT4 ~ IT7，对所有其他公称尺寸和所有其他 IT 等级的基本偏差 k = 0；孔的基本偏差 K 的计算公式仅适用于标准公差等级小于或等于 IT8，对所有其他公称尺寸和所有其他 IT 等级的基本偏差 K = 0。

a ~ h 用于间隙配合，基本偏差的绝对值等于配合的最小间隙。其中，d、e、f 主要用于能形成良好液体摩擦的旋转运动；g 主要用于滑动或半液体摩擦，也可用于定位配合；cd、ef、fg 适用于尺寸较小的旋转运动；h 广泛用于无相对转动的零件，作为一般的定位配合，精度高时，也用于精密滑动配合。

j ~ n 主要用于过渡配合，由于配合形成的间隙或过盈较小，可以保证孔与轴较好的对中性，且安装与拆卸难度不大，主要用于定位精确并要求拆卸的相对静止的连接。

p ~ zc 主要用于过盈配合，其基本偏差常按相配的基准孔的标准公差（多数为 H7）和所需的最小过盈来确定其基本偏差。最小过盈的系数符合优先系数，规律性较好，便于应用。

计算得到的轴的基本偏差，需要经过修约规则的修约。极限与配合国标中轴的基本偏差数值见表 2-9。

2. 孔的基本偏差

孔的基本偏差按表 2-8 中给出的公式计算。极限与配合国标中孔的基本偏差数值见表 2-10。

表 2-9　轴的基本偏差数值　　（单位：μm）

基本尺寸/mm		基本偏差数值（上极限偏差 es）											
		所有标准公差等级											
大于	至	a	b	c	cd	d	e	ef	f	fg	g	h	js
—	3	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	偏差 = $\pm\frac{ITn}{2}$，式中 ITn 是 IT 值数
3	6	-270	-140	-70	-46	-30	-20	-14	-10	-6	-4	0	
6	10	-280	-150	-80	-56	-40	-25	-18	-13	-8	-5	0	
10	14	-290	-150	-95		-50	-32		-16		-6	0	
14	18												
18	24	-300	-160	-110		-65	-40		-20		-7	0	
24	30												
30	40	-310	-170	-120		-80	-50		-25		-9	0	
40	50	-320	-180	-130									
50	65	-340	-190	-140		-100	-60		-30		-10	0	
65	80	-360	-200	-150									
80	100	-380	-220	-170		-120	-72		-36		-12	0	
100	120	-410	-240	-180									
120	140	-460	-260	-200		-145	-85		-43		-14	0	
140	160	-520	-280	-210									
160	180	-580	-310	-230									
180	200	-660	-340	-240		-170	-100		-50		-15	0	
200	225	-740	-380	-260									
225	250	-820	-420	-280									
250	280	-920	-480	-300		-190	-110		-56		-17	0	
280	315	-1050	-540	-330									

（续）

基本尺寸/mm		基本偏差数值（上极限偏差 es）											
		所有标准公差等级											
大于	至	a	b	c	cd	d	e	ef	f	fg	g	h	js
315	335	－1200	－600	－360		－210	－125		－62		－18	0	偏差 $= \pm\frac{\mathrm{IT}n}{2}$，式中 IT$n$ 是 IT 值数
355	400	－1350	－680	－400									
400	450	－1500	－760	－440		－230	－135		－68		－20	0	
450	500	－1650	－840	－480									
500	560					－260	－145		－76		－22	0	
560	630												
630	710					－290	－160		－80		－24	0	
710	800												
800	900					－320	－170		－86		－26	0	
900	1000												
1000	1120					－350	－195		－98		－28	0	
1120	1250												
1250	1400					－390	－220		－110		－30	0	
1400	1600												
1600	1800					－430	－240		－120		－32	0	
1800	2000												
2000	2240					－480	－260		－130		－34	0	
2240	2500												
2500	2800					－520	－290		－145		－38	0	
2800	3150												

（续）

基本尺寸/mm		基本偏差数值（下极限偏差 ei）																		
大于	至	IT5和IT6	IT7	IT8	IT4～IT7	≤IT3 >IT7	所有标准公差等级													
		j			k		m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z	za	zb	zc
—	3	-2	-4	-6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14		+18		+20		+26	+32	+40	+60
3	6	-2	-4		+1	0	+4	+8	+12	+15	+19		+23		+28		+35	+42	+50	+80
6	10	-2	-5		+1	0	+6	+10	+15	+19	+23		+28		+34		+42	+52	+67	+97
10	14	-3	-6		+1	0	+7	+12	+18	+23	+28		+33		+40		+50	+64	+90	+130
14	18													+39	+45		+60	+77	+108	+150
18	24	-4	-8		+2	0	+8	+15	+22	+28	+35		+41	+47	+54	+63	+73	+98	+136	+188
24	30											+41	+48	+55	+64	+75	+88	+118	+160	+218
30	40	-5	-10		+2	0	+9	+17	+26	+34	+43	+48	+60	+68	+80	+94	+112	+148	+200	+274
40	50											+54	+70	+81	+97	+114	+136	+180	+242	+325
50	65	-7	-12		+2	0	+11	+20	+32	+41	+53	+66	+87	+102	+122	+144	+172	+226	+300	+405
65	80									+43	+59	+75	+102	+120	+146	+174	+210	+274	+360	+480
80	100	-9	-15		+3	0	+13	+23	+37	+51	+71	+91	+124	+146	+178	+214	+258	+335	+445	+585
100	120									+54	+79	+104	+144	+172	+210	+254	+310	+400	+525	+690

（续）

基本尺寸/mm		基本偏差数值（下极限偏差 ei）																		
		IT5和IT6	IT7	IT8	IT4 ~ IT7	≤IT3 >IT7	所有标准公差等级													
大于	至	j			k		m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z	za	zb	zc
120	140	−11	−18		+3	0	+15	+27	+43	+63	+92	+122	+170	+202	+248	+300	+365	+470	+620	+800
140	160									+65	+100	+134	+190	+228	+280	+340	+415	+535	+700	+900
160	180									+68	+108	+146	+210	+252	+310	+380	+465	+600	+780	+1000
180	200	−13	−21		+4	0	+17	+31	+50	+77	+122	+166	+236	+284	+350	+425	+520	+670	+880	+1150
200	225									+80	+130	+180	+258	+310	+385	+470	+575	+740	+960	+1250
225	250									+84	+140	+196	+284	+340	+425	+520	+640	+820	+1050	+1350
250	280	−16	−26		+4	0	+20	+34	+56	+94	+158	+218	+315	+385	+475	+580	+710	+920	+1200	+1550
280	315									+98	+170	+240	+350	+425	+525	+650	+790	+1000	+1300	+1700
315	355	−18	−28		+4	0	+21	+37	+62	+108	+190	+268	+390	+475	+590	+730	+900	+1150	+1500	+1900
355	400									+114	+208	+294	+435	+530	+660	+820	+1000	+1300	+1650	+2100
400	450	−20	−32		+5	0	+23	+40	+68	+126	+232	+330	+490	+595	+740	+920	+1100	+1450	+1850	+2400
450	500									+132	+252	+360	+540	+660	+820	+1000	+1250	+1600	+2100	+2600
500	560				0	0	+26	+44	+78	+150	+280	+400	+600							
560	630									+155	+310	+450	+660							

基本尺寸/mm		基本偏差数值（下极限偏差 ei）																		
大于	至	IT5和IT6	IT7	IT8	IT4~IT7	≤IT3 >IT7	所有标准公差等级													
		j			k		m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z	za	zb	zc
630	710				0	0	+30	+50	+88	+175	+340	+500	+740							
710	800									+185	+380	+560	+840							
800	900				0	0	+34	+56	+100	+210	+430	+620	+940							
900	1000									+220	+470	+680	+1050							
1000	1120				0	0	+40	+66	+120	+250	+520	+780	+1150							
1120	1250									+260	+580	+840	+1300							
1250	1400				0	0	+48	+78	+140	+300	+640	+960	+1450							
1400	1600									+330	+720	+1050	+1600							
1600	1800				0	0	+58	+92	+170	+370	+820	+1200	+1850							
1800	2000									+400	+920	+1350	+2000							
2000	2240				0	0	+68	+110	+195	+440	+1000	+1500	+2300							
2240	2500									+460	+1100	+1650	+2500							
2500	2800				0	0	+76	+135	+240	+550	+1250	+1900	+2900							
2800	3150									+580	+1400	+2100	+3200							

注：基本尺寸小于或等于1mm时，基本偏差a和b均不采用。公差带js7~js11，若ITn值数是奇数，则取偏差 = $\pm\frac{\mathrm{IT}n-1}{2}$。

表 2-10　孔的基本偏差数值　　　　（单位：μm）

公称尺寸/mm		基本偏差数值																					
		下极限偏差 EI												上极限偏差 ES									
大于	至	所有标准公差等级												IT6	IT7	IT8	≤IT8	>IT8	≤IT8	>IT8	≤IT8	>IT8	≤IT7
		A	B	C	CD	D	E	EF	F	FG	G	H	JS	J			K		M		N		P 至 ZC
—	3	+270	+140	+60	+34	+20	+14	+10	+6	+4	+2	0	偏差 = $\pm\frac{ITn}{2}$，式中 ITn 是 IT 值数	+2	+4	+6	0	0	−2	−2	−4	−4	在大于 IT7 的相应数值上增加一个 Δ 值
3	6	+270	+140	+70	+46	+30	+20	+14	+10	+6	+4	0		+5	+6	+10	−1 +Δ		−4 +Δ	−4	−8 +Δ	0	
6	10	+280	+150	+80	+56	+40	+25	+18	+13	+8	+5	0		+5	+8	+12	−1 +Δ		−6 +Δ	−6	−10 +Δ	0	
10	14	+290	+150	+95		+50	+32		+16		+6	0		+6	+10	+15	−1 +Δ		−7 +Δ	−7	−12 +Δ	0	
14	18																						
18	24	+300	+160	+110		+65	+40		+20		+7	0		+8	+12	+20	−2 +Δ		−8 +Δ	−8	−15 +Δ	0	
24	30																						
30	40	+310	+170	+120		+80	+50		+25		+9	0		+10	+14	+24	−2 +Δ		−9 +Δ	−9	−17 +Δ	0	
40	50	+320	+180	+130																			
50	65	+340	+190	+140		+100	+60		+30		+10	0		+13	+18	+28	−2 +Δ		−11 +Δ	−11	−20 +Δ	0	
65	80	+360	+200	+150																			
80	100	+380	+220	+170		+120	+72		+36		+12	0		+16	+22	+34	−3 +Δ		−13 +Δ	−13	−23 +Δ	0	
100	120	+410	+240	+180																			
120	140	+460	+260	+200		+145	+85		+43		+14	0		+18	+26	+41	−3 +Δ		−15 +Δ	−15	−27 +Δ	0	
140	160	+520	+280	+210																			
160	180	+580	+310	+230																			
180	200	+660	+340	+240		+170	+100		+50		+15	0		+22	+30	+47	−4 +Δ		−17 +Δ	−17	−31 +Δ	0	
200	225	+740	+380	+260																			
225	250	+820	+420	+280																			

（续）

公称尺寸/mm		基本偏差数值																					
		下极限偏差 EI												上极限偏差 ES									
大于	至	所有标准公差等级												IT6	IT7	IT8	≤IT8	>IT8	≤IT8	>IT8	≤IT8	>IT8	≤IT7
		A	B	C	CD	D	E	EF	F	FG	G	H	JS	J			K		M		N		P 至 ZC
250	280	+920	+480	+300		+190	+110		+56		+17	0	偏差 = $\pm\frac{ITn}{2}$，式中 ITn 是 IT 值数	+25	+36	+55	−4+Δ		−20+Δ	−20	−34+Δ	0	在大于 IT7 的相应数值上增加一个 Δ 值
280	315	+1050	+540	+330																			
315	355	+1200	+600	+360		+210	+125		+62		+18	0		+29	+39	+60	−4+Δ		−21+Δ	−21	−37+Δ	0	
355	400	+1350	+680	+400																			
400	450	+1500	+760	+440		+230	+135		+68		+20	0		+33	+43	+66	−5+Δ		−23+Δ	−23	−40+Δ	0	
450	500	+1650	+840	+480																			
500	560					+260	+145		+76		+22	0					0		−26		−44		
560	630																						
630	710					+290	+160		+80		+24	0					0		−30		−50		
710	800																						
800	900					+320	+170		+86		+26	0					0		−34		−56		
900	1000																						
1000	1120					+350	+195		+98		+28	0					0		−40		−66		
1120	1250																						
1250	1400					+390	+220		+110		+30	0					0		−48		−78		
1400	1600																						
1600	1800					+430	+240		+120		+32	0					0		−58		−92		
1800	2000																						
2000	2240					+480	+260		+130		+34	0					0		−68		−110		
2240	2500																						
2500	2800					+520	+290		+145		+38	0					0		−76		−135		
2800	3150																						

（续）

公称尺寸/mm		基本偏差数值												Δ值					
		上极限偏差 ES																	
大于	至	标准公差等级大于 IT7												标准公差等级					
		P	R	S	T	U	V	X	Y	Z	ZA	ZB	ZC	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8
—	3	-6	-10	-14		-18		-20		-26	-32	-40	-60	0	0	0	0	0	0
3	6	-12	-15	-19		-23		-28		-35	-42	-50	-80	1	1. 5	1	3	4	6
6	10	-15	-19	-23		-28		-34		-42	-52	-67	-97	1	1. 5	2	3	6	7
10	14	-18	-23	-28		-33		-40		-50	-64	-90	-130	1	2	3	3	7	9
14	18						-39	-45		-60	-77	-108	-150						
18	24	-22	-28	-35		-41	-47	-54	-63	-73	-98	-136	-188	1. 5	2	3	4	8	12
24	30				-41	-48	-55	-64	-75	-88	-118	-160	-218						
30	40	-26	-34	-43	-48	-60	-68	-80	-94	-112	-148	-200	-274	1. 5	3	4	5	9	14
40	50				-54	-70	-81	-97	-114	-136	-180	-242	-325						
50	65	-32	-41	-53	-66	-87	-102	-122	-144	-172	-226	-300	-405	2	3	5	6	11	16
65	80		-43	-59	-75	-102	-120	-146	-174	-210	-274	-360	-480						
80	100	-37	-51	-71	-91	-124	-146	-178	-214	-258	-335	-445	-585	2	4	5	7	13	19
100	120		-54	-79	-104	-144	-172	-210	-254	-310	-400	-525	-690						
120	140	-43	-63	-92	-122	-170	-202	-248	-300	-365	-470	-620	-800	3	4	6	7	15	23
140	160		-65	-100	-134	-190	-228	-280	-340	-415	-535	-700	-900						
160	180		-68	-108	-146	-210	-252	-310	-380	-465	-600	-780	-1000						
180	200	-50	-77	-122	-166	-236	-284	-350	-425	-520	-670	-880	-1150	3	4	6	9	17	26
200	225		-80	-130	-180	-258	-310	-385	-470	-575	-740	-960	-1250						
225	250		-84	-140	-196	-284	-340	-425	-520	-640	-820	-1050	-1350						
250	280	-56	-94	-158	-218	-315	-385	-475	-580	-710	-920	-1200	-1550	4	4	7	9	20	29
280	315		-98	-170	-240	-350	-425	-525	-650	-790	-1000	-1300	-1700						

（续）

公称尺寸/mm		基本偏差数值												Δ 值					
		上极限偏差 ES																	
大于	至	标准公差等级大于 IT7												标准公差等级					
		P	R	S	T	U	V	X	Y	Z	ZA	ZB	ZC	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8
315	355	−62	−108	−190	−268	−390	−475	−590	−730	−900	−1150	−1500	−1900	4	5	7	11	21	32
355	400		−114	−208	−294	−435	−530	−660	−820	−1000	−1300	−1650	−2100						
400	450	−68	−126	−232	−330	−490	−595	−740	−920	−1100	−1450	−1850	−2400	5	5	7	13	23	34
450	500		−132	−252	−360	−540	−660	−820	−1000	−1250	−1600	−2100	−2600						
500	560	−78	−150	−280	−400	−600													
560	630		−155	−310	−450	−660													
630	710	−88	−175	−340	−500	−740													
710	800		−185	−380	−560	−840													
800	900	−100	−210	−430	−620	−940													
900	1000		−220	−470	−680	−1050													
1000	1120	−120	−250	−520	−780	−1150													
1120	1250		−260	−580	−840	−1300													
1250	1400	−140	−300	−640	−960	−1450													
1400	1600		−330	−720	−1050	−1600													
1600	1800	−170	−370	−820	−1200	−1850													
1800	2000		−400	−920	−1350	−2000													
2000	2240	−195	−440	−1000	−1500	−2300													
2240	2500		−460	−1100	−1650	−2500													
2500	2800	−240	−550	−1250	−1900	−2900													
2800	3150		−580	−1400	−2100	−3200													

注：1. 公称尺寸小于或等于 1mm 时，基本偏差 A 和 B 及大于 IT8 的 N 均不采用，公差带 JS7 至 JS11，若 ITn 值数是奇数，则取偏差 = $\pm\frac{\mathrm{IT}n-1}{2}$。

2. 对小于或等于 IT8 的 K、M、N 和小于或等于 IT7 的 P 至 ZC，所需 Δ 值从表内右侧选取。例如：18 ~ 30mm 段的 K7，Δ = 8μm，所以 ES = −2μm + 8μm = +6μm；18 ~ 30mm 段的 S6，Δ = 4μm，所以 ES = −35μm + 4μm = −31μm。特殊情况：250 ~ 315mm 段的 M6，ES = −9μm（代替 −11μm）。

由图 2-11 可见，一般用同一字母表示的孔的基本偏差与轴的基本偏差相对于零线是完全对称的，因此，孔的基本偏差的数值可以由相应代号的轴的基本偏差的数值按照一定的规则换算得到。即孔与轴的基本偏差代号对应时（如 D 对应 d），两者的基本偏差的绝对值相等，而符号相反，即

$$ES = -ei$$
$$EI = -es \tag{2-9}$$

该规则适用于所有的基本偏差，称为通用规则，但以下情况例外：

a）公称尺寸在 >3 ~ 500mm 之间，标准公差等级大于 IT8 的孔的基本偏差 N，其数值（ES）等于零。

b）在公称尺寸 >3 ~ 500mm 的基孔制或基轴制配合中，给定某一公差等级的孔要与更精一级的轴相配（例如 H7/p6 和 P7/h6），并要求具有同等的间隙或过盈（见图 2-12）。此时，计算的孔的基本偏差应附加一个 Δ 值，称为特殊规则，即

$$ES = -ei + \Delta \tag{2-10}$$
$$\Delta = ITn - IT(n-1)$$

式中　Δ——公称尺寸段内给定的某一标准公差等级 ITn 与更精一级的标准公差等级 IT（$n-1$）的差值。

例如：公称尺寸段 18 ~ 30mm 的 P7：

$$\Delta = ITn - IT(n-1) = IT7 - IT6 = 21\mu m - 13\mu m = 8\mu m$$

特殊规则仅适用于公称尺寸大于 3mm、标准公差等级小于或等于 IT8 的孔的基本偏差 K、M、N 和标准公差等级小于或等于 IT7 的孔的基本偏差 P ~ ZC。

3. 基本偏差 js 和 JS

除孔的 J 和 JS、轴的 j 和 js（严格地说两者无基本偏差）外，孔、轴的基本偏差的数值与选用的标准公差等级无关。

基本偏差 js 和 JS 的公差带对称分布于零线的两侧（见图 2-13），即：

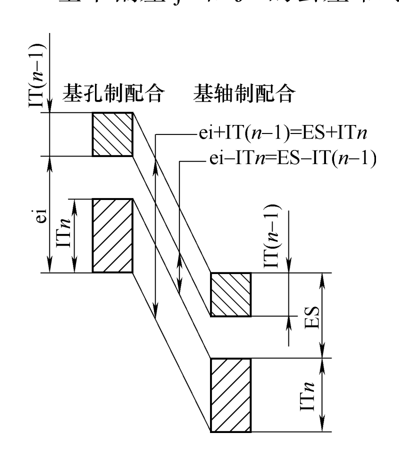


图 2-12　特殊规则的图解

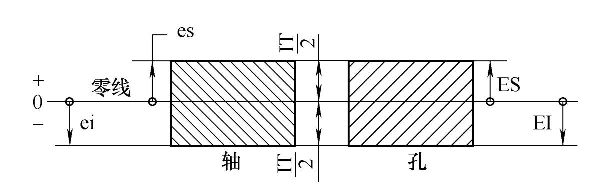


图 2-13　偏差 js 和 JS

对 js：$es = +\frac{IT}{2}$

$ei = -\frac{IT}{2}$

对 JS：$ES = +\frac{IT}{2}$

$EI = -\frac{IT}{2}$

当公差带为 js7 ~ js11 或 JS7 ~ JS11 时，若标准公差 ITn 的数值为奇数，则：

对 js：$es = +\frac{ITn-1}{2}$

$ei = -\frac{ITn-1}{2}$

对 JS：$ES = +\frac{ITn-1}{2}$

$EI = -\frac{ITn-1}{2}$

由于 JS 和 js 将逐渐取代近似对称偏差 J 和 j，所以在国家标准中，孔仅保留了 J6、J7、J8 三种公差带，轴仅保留了 j5、j6、j7、j8 四种公差带。

【例 2-4】 查表确定 ϕ20H7/e6 和 ϕ20E7/h6 两配合的孔、轴极限偏差，画出尺寸公差带图。

解： 查表 2-7，公称尺寸 20mm 在尺寸段在 >18 ~ 30mm 内，IT6 = 0.013mm，IT7 = 0.021mm。

计算 H7 的极限偏差：

$$EI = 0$$

$$ES = EI + IT7 = 0 + 0.021\text{mm} = +0.021\text{mm}$$

计算 e6 的极限偏差，查表 2-9 得

$$es = -0.040\text{mm}$$

$$ei = es - IT6 = -0.040\text{mm} - 0.013\text{mm} = -0.053\text{mm}$$

ϕ20H7/e6 的尺寸公差带见图 2-14。

计算 E7 的极限偏差，查表 2-10 得

$$EI = +0.040\text{mm}$$

$$ES = EI + IT7 = 0.040\text{mm} + 0.021\text{mm} = +0.061\text{mm}$$

计算 h6 的极限偏差：

$$es = 0$$

$$ei = es - IT6 = 0 - 0.013\text{mm} = -0.013\text{mm}$$

ϕ20E7/h6 的尺寸公差带图见图 2-15。

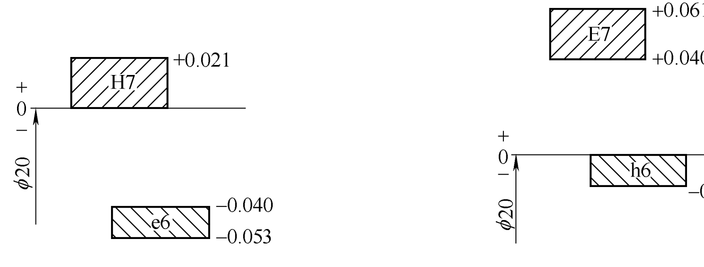


图 2-14　ϕ20H7/e6 的尺寸公差带　　　图 2-15　ϕ20E7/h6 的尺寸公差带

ϕ20H7/e6 是基孔制间隙配合，ϕ20E7/h6 是基轴制间隙配合，配合的极限间隙分别为

$$X_{max} = 0.021\text{mm} + 0.053\text{mm} = 0.061\text{mm} + 0.013\text{mm} = +0.074\text{mm}$$

$$X_{min} = 0 + 0.040\text{mm} = 0.040\text{mm} - 0 = +0.040\text{mm}$$

所以 ϕ20H7/e6（基孔制配合）与 ϕ20E7/h6（基轴制配合）的配合性质相同。

【例 2-5】 确定孔 ϕ130N4 的极限偏差和极限尺寸。

解： 公称尺寸 130mm 在 120～180mm 尺寸段内，查表 2-7 得

$$标准公差\ IT4 = 12\mu m$$

查表 2-10 得

$$基本偏差\ ES = -27\mu m + \Delta = -27\mu m + 4\mu m = -23\mu m$$

$$下极限偏差\ EI = ES - IT4 = -23\mu m - 12\mu m = -35\mu m$$

极限尺寸：上极限尺寸 = 130mm − 0.023mm = 129.977mm

下极限尺寸 = 130mm − 0.035mm = 129.965mm

2.3　国家标准规定的公差带与配合

按照极限与配合国家标准（GB/T 1800.1—2009），孔与轴各有 28 种基本偏差和 20 个标准公差等级，组合可以得到 543 种孔公差带和 544 种轴公差带，孔与轴的公差带又能组成大量的配合。生产当中同时应用所有可能的公差带显然是不经济的。从经济性出发，应减少定值刀具、量具及工艺装备的品种和规格，以利于生产和技术工作。参考国际标准（ISO）并结合我国国情，国家标准对公差带与配合的选择做了一定的限制。

2.3.1　极限与配合国家标准（GB/T 1800.2—2009）规定的公差带

公称尺寸≤500mm 时，国家标准规定了 203 种孔的公差带（见图 2-16）。

公称尺寸 >500～3150mm 时，国家标准规定了 82 种孔的公差带，其中虚线框格内的 H1～H5、JS1～JS5 为试用（见图 2-17）。

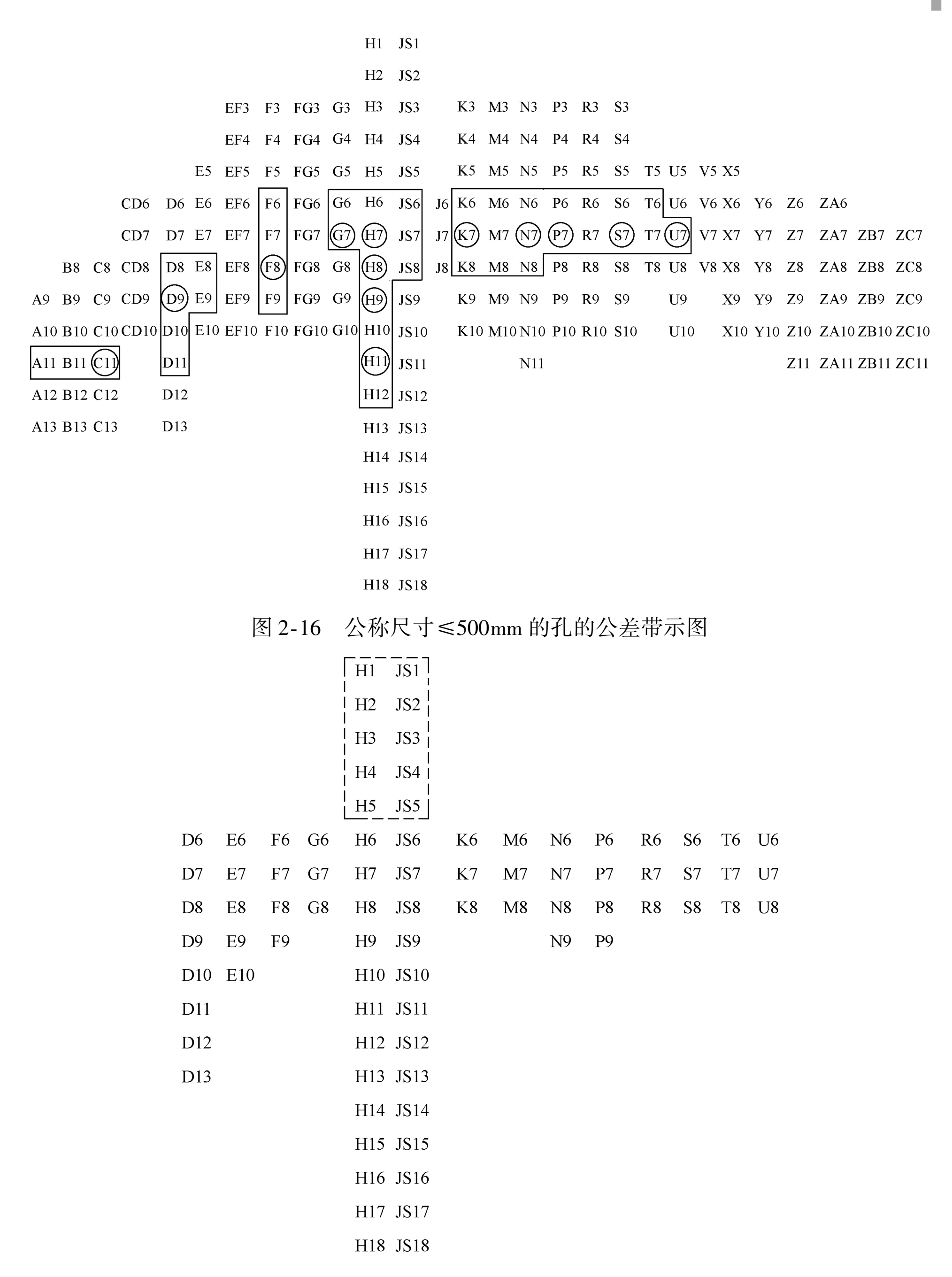


图 2-16 公称尺寸≤500mm 的孔的公差带示图

图 2-17 公称尺寸 >500 ~3150mm 的孔的公差带示图

公称尺寸≤500mm 时，国家标准规定的 199 种轴的公差带见图 2-18。

公称尺寸 >500 ~3150mm 时，国家标准规定了 79 种轴的公差带，其中虚线框格内的 h1 ~h5、js1 ~js5 为试用（见图 2-19）。

h1 js1
h2 js2
ef3 f3 fg3 g3 h3 js3 k3 m3 n3 p3 r3 s3
ef4 f4 fg4 g4 h4 js4 k4 m4 n4 p4 r4 s4
cd5 d5 e5 ef5 f5 fg5 g5 h5 js5 j5 k5 m5 n5 p5 r5 s5 t5 u5 v5 x5
cd6 d6 e6 ef6 f6 fg6 g6 h6 js6 j6 k6 m6 n6 p6 r6 s6 t6 u6 v6 x6 y6 z6 za6
cd7 d7 e7 ef7 f7 fg7 g7 h7 js7 j7 k7 m7 n7 p7 r7 s7 t7 u7 v7 x7 y7 z7 za7 zc7
c8 cd8 d8 e8 ef8 f8 fg8 g8 h8 js8 j8 k8 m8 n8 p8 r8 s8 t8 u8 v8 x8 y8 z8 za8 zc8
a9 b9 c9 cd9 d9 e9 ef9 f9 fg9 g9 h9 js9 k9 m9 n9 p9 r9 s9 u9 x9 y9 z9 za9 zc9
a10 b10 c10 cd10 d10 e10 ef10 f10 fg10 g10 h10 js10 k10 p10 r10 s10 x10 y10 z10 za10 zc10
a11 b11 c11 d11 h11 js11 k11 y11 z11 za11 zc11
a12 b12 c12 d12 h12 js12 k12
a13 b13 d13 h13 js13 k13
h14 js14
h15 js15
h16 js16
h17 js17
h18 js18

图 2-18　公称尺寸≤500mm 的轴的公差带示图

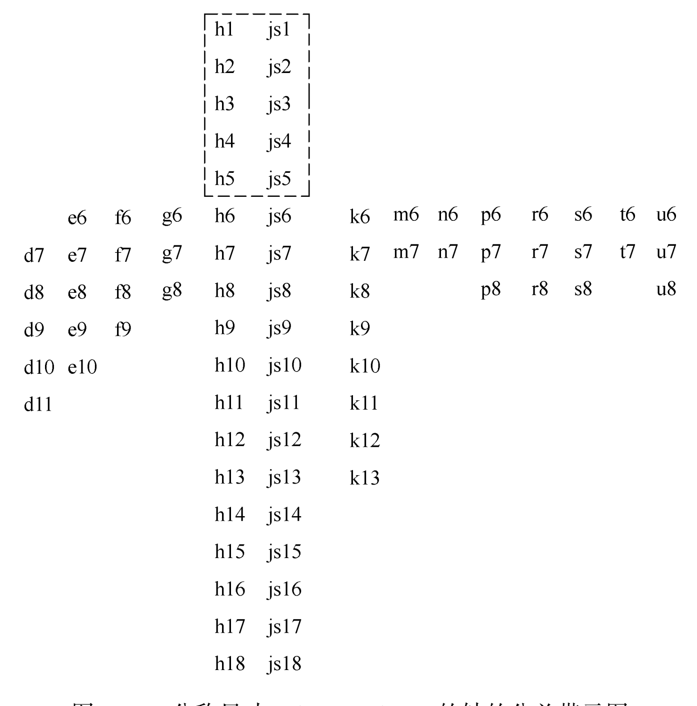


图 2-19　公称尺寸 >500 ~ 3150mm 的轴的公差带示图

2.3.2 极限与配合国家标准（GB/T 1801—2009）规定的公差带与配合

为了简化标准和使用方便，根据实际需要规定了优先、常用和一般用途的孔、轴公差带。

在公称尺寸≤500mm 范围内，图 2-16 与图 2-18 中圆圈表示优先公差带，方框表示常用公差带（轴的优先公差带 13 种，常用公差带 59 种，孔的优先公差带 13 种，常用公差带 44 种）。

极限与配合国家标准推荐，在公称尺寸≤500mm 范围内，对基孔制规定了 13 种优先配合和 59 种常用配合（见表 2-11），对基轴制规定的 13 种优先配合和 47 种常用配合（见表 2-12），以供选择使用。

在进行零件的精度设计时，应按照优先、常用、一般用途公差带的顺序选用。确定配合时，应按照优先、常用配合的顺序选用配合。当上述选择不能满足使用要求时，允许由标准公差和基本偏差组成所需要的公差带与配合。

表 2-11 基孔制优先、常用配合

基准孔	轴																				
	a	b	c	d	e	f	g	h	js	k	m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z
	间隙配合								过渡配合							过盈配合					
H6						H6/f5	H6/g5	H6/h5	H6/js5	H6/k5	H6/m5	H6/n5	H6/p5	H6/r5	H6/s5	H6/t5					
H7						H7/f6	◤H7/g6	◤H7/h6	H7/js6	◤H7/k6	H7/m6	◤H7/n6	◤H7/p6	H7/r6	◤H7/s6	H7/t6	◤H7/u6	H7/v6	H7/x6	H7/y6	H7/z6
H8				H8/d7	H8/e7	◤H8/f7	H8/g7	◤H8/h7	H8/js7	H8/k7	H8/m7	H8/n7	H8/p7	H8/r7	H8/s7	H8/t7	H8/u7				
				H8/d8	H8/e8	H8/f8		H8/h8													
H9				◤H9/d9	H9/e9	H9/f9		◤H9/h9													
H10			H10/c10	H10/d10				H10/h10													
H11	H11/a11	H11/b11	◤H11/c11	H11/d11				◤H11/h11													
H12		H12/b12						H12/h12													

注：1. H6/n5、H7/p6 在公称尺寸≤3mm 和 H8/r7 在公称尺寸≤100mm 时，为过渡配合。

2. 标注◤的配合为优先配合。

3. 摘自 GB/T 1801—2009。

表 2-12 基轴制优先、常用配合

基准轴	孔																				
	A	B	C	D	E	F	G	H	JS	K	M	N	P	R	S	T	U	V	X	Y	Z
	间隙配合								过渡配合				过盈配合								
h5						F6/h5	G6/h5	H6/h5	JS6/h5	K6/h5	M6/h5	N6/h5	P6/h5	R6/h5	S6/h5	T6/h5					
h6						F7/h6	◤G7/h6	◤H7/h6	JS7/h6	◤K7/h6	M7/h6	◤N7/h6	◤P7/h6	R7/h6	◤S7/h6	T7/h6	◤U7/h6				
h7					E8/h7	◤F8/h7		◤H8/h7	JS8/h7	K8/h7	M8/h7	N8/h7									
h8				D8/h8	E8/h8	F8/h8		H8/h8													
h9				◤D9/h9	E9/h9	F9/h9		◤H9/h9													
h10				D10/h10				H10/h10													
h11	A11/h11	B11/h11	◤C11/h11	D11/h11				◤H11/h11													
h12		B12/h12						H12/h12													

注：1. 标注◤的配合为优先配合。
2. 摘自 GB/T 1801—2009。

2.4 公差与配合的选用

公差与配合的选择是机械设计与制造的重要环节，其基本原则是经济地满足使用性能要求，并获得最佳技术经济效益。极限与配合国家标准的应用，就是根据使用要求正确合理地选择符合标准规定的孔、轴的公差带大小和公差带位置，即在公称尺寸确定之后，来选择公差等级、配合制和配合种类（基本偏差）的问题。

2.4.1 基准制的选用

国家标准规定了两种基准制：基孔制配合和基轴制配合。一般来说，基孔制和基轴制配合的性质相同，即极限间隙或极限过盈相同，如 H7/f6 与 F7/h6 有相同的最大间隙和最小间隙；H7/k6 与 K7/h6 有相同的最大间隙和最大过盈。所以，在一般情况下，无论选用基孔制还是基轴制配合，均可满足同样的使用要求。因此，基准制的选择基本上与使用要求无关，主要应从生产、工艺的经济性和结构的合理性等方面综合考虑。

1）一般情况下，应优先选用基孔制。在公称尺寸和公差等级一定的情况下，基准孔的极限尺寸是一定的，不同的配合可以用不同的极限尺寸的配合轴形成。采用基孔制，可以最大限度地减少孔的尺寸种类，可大大减少定尺寸刀具、量具（如钻头、铰刀、拉刀、塞规等）的规格和数量，从而获得显著的经济效益，有利于刀具、量具的标准化、系列化，也将给经济合理地使用它们带来方便。

2）下列情况可以选用基轴制：

a）选用基轴制具有明显的经济效果。如农业机械、纺织机械中，经常使用具有一定精度的（IT8）冷拔光轴，不必切削加工。

b）同一公称尺寸的轴与几个孔配合，且配合要求不同，如活塞销与活塞、连杆的配合。

如图2-20所示，活塞销同时与活塞和连杆上的孔配合，连杆在销轴上摆动一定的角度，所以连杆与活塞销采用间隙配合。为减小冲击和振动，活塞销与活塞孔应支撑可靠，配合应紧一些，故采用平均为较大过盈的过渡配合。

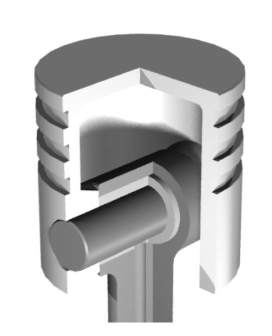


图2-20 活塞销与活塞、连杆配合

如采用基孔制，活塞销需做成中间小、两头大的形状，这样既不便于加工，也不便于装配见图2-21a、b、c。活塞销处于图a位置时，活塞销与连杆内孔有擦伤，使用性能下降；处于图b位置时，不易保证活塞销与活塞孔的对中性要求，装

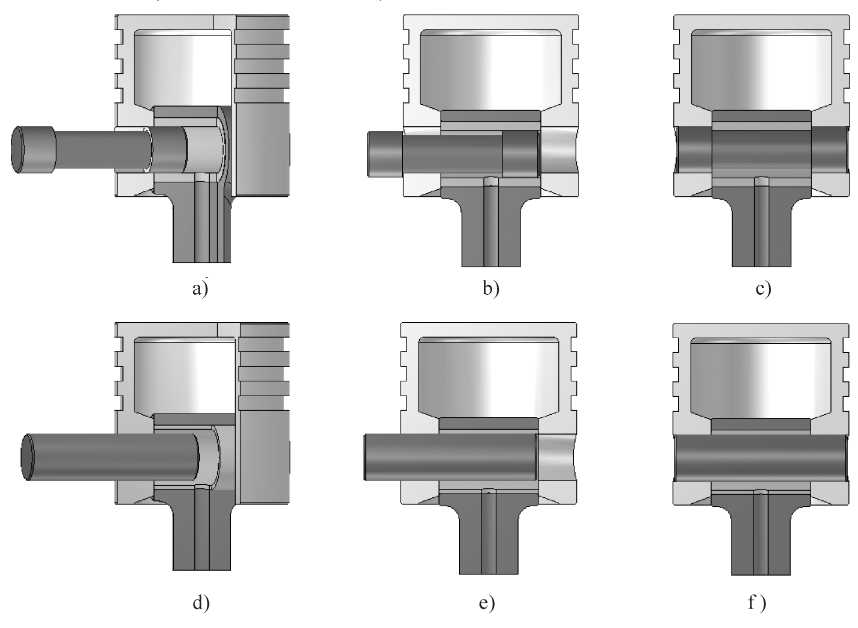


图2-21 活塞销与活塞、连杆装配示意图
a）b）c）基孔制配合的装配示意图 d）e）f）基轴制配合的装配示意图

配困难；处于图 c 位置时，装配完成。

如采用基轴制，活塞销可制成光轴，则便于加工和装配，降低成本（见图2-21d、e、f）。活塞销处于图 d 位置时，活塞销与连杆内孔有间隙，不易擦伤，装配质量好；处于图 e 位置时，易于保证活塞销与活塞孔的对中性要求，装配容易；处于图 c 位置时，装配顺利完成。

3）与标准件配合时，基准制的选择通常依标准件而定。如与滚动轴承内圈配合的轴应按基孔制，与滚动轴承外圈配合的壳体孔应选用基轴制。

4）为了满足某些配合的特殊需要，允许采用任一孔、轴公差带组成所需要的配合。如变速箱端盖与箱体孔的配合为 K7/d10，轴套与轴的配合为 D9/k6 等(见图2-22)。

2.4.2 公差等级的选择

公差等级的选择直接影响产品的使用性能和加工的经济性。公差等级选择过高，将使产品的加工困难，制造成本增加；公差等级选择过低，产品质量会得不到保证。因此，合理选择公差等级，对解决产品的使用要求与制造工艺及成本之间的矛盾，起着至关重要的作用。公差等级选用的基本原则如下：

1）在满足使用要求的前提下，尽量扩大公差值，即选用较低的公差等级。

2）对于≤500mm 的公称尺寸，当公差等级在 IT7 级及其以上精度时，推荐孔比轴低一级，如 H7/f6、H6/k5 等；当公差等级为 IT8 级时，孔可以比轴低一级配合，也可采用同级配合，如 H8/d8、H8/d7 等；当公差等级在 IT9 级及以下精度时，一般采用同级孔、轴配合，如 H9/d9、H11/e11 等。

3）对于 >500mm 的公称尺寸，推荐采用同级孔、轴配合。

4）注意与相配合零件或部件的精度协调。如齿轮孔的公差等级与齿轮的精度等级相协调；与轴承配合的轴的精度等级应当与轴承的精度等级相协调。

各公差等级的应用范围见表 2-13，各种加工方法的合理加工精度见表 2-14，配合尺寸公差等级的应用见表 2-15。

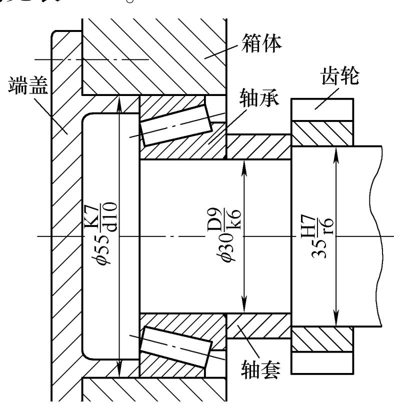


图2-22　端盖、箱体上的外壳孔、轴承、隔套、轴、齿轮之间的配合

表 2-13 标准公差等级的应用范围

应用	公差等级（IT）																			
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
量块	—	—	—																	
量规			—	—	—	—	—	—	—											
特精件配合				—	—	—	—													
一般配合							—	—	—	—	—	—	—	—						
原材料公差										—	—	—	—	—	—	—				
未注公差尺寸														—	—	—	—	—	—	—

表 2-14 各种加工方法的合理加工精度

应用	公差等级（IT）																			
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
研磨	—	—	—	—	—	—	—													
珩磨						—	—	—	—											
圆磨							—	—	—	—										
平磨							—	—	—	—										
金刚石车							—	—	—											
金刚石镗							—	—	—											
拉削							—	—	—	—										
铰孔							—	—	—	—	—	—								
车									—	—	—	—	—							
镗									—	—	—	—	—							
铣										—	—	—	—							
刨、插												—	—							
钻孔												—	—	—	—					
滚压、挤压												—	—							
冲压												—	—	—	—	—				
压铸													—	—	—	—				
粉末冶金成型								—	—	—										
粉末冶金烧结									—	—	—	—								
砂型铸造气割																		—	—	—
锻造																	—			

表 2-15　配合尺寸公差等级的应用

公差等级	重要处		常用处		次要处	
	孔	轴	孔	轴	孔	轴
精密机械	IT4	IT4	IT6	IT5	IT7	IT6
一般机械	IT5	IT5	IT7	IT6	IT8	IT9
较粗机械	IT7	IT6	IT8	IT9	IT10 ~ IT12	

2.4.3　配合的选用

配合有间隙、过盈和过渡配合三种情况。配合的选用主要是根据使用要求，确定配合类别和配合代号。选用配合时，首先应尽可能地选用优先配合或常用配合。如果优先配合或常用配合不能满足使用要求，可以选用标准推荐的一般用途的孔、轴公差带，并按使用要求组成配合。若仍然不能满足使用要求，还可以从国家标准所提供的 544 种轴公差带和 543 种孔公差带中选取合适的公差带，组成所需要的配合。

在确定了配合的基准制之后，选择配合就是根据使用要求（间隙或过盈的大小），确定与基准件相配合的孔或轴的基本偏差代号，同时确定孔、轴的公差等级。一般选用配合的方法有下列三种：

（1）计算法　根据一定的理论和公式（如流体润滑理论、弹塑性变形理论等）计算出所需要间隙或过盈，然后选择适当的配合。因工程实际中的工作条件复杂，影响配合的因素众多，理论计算多数是近似结果，所以，在实际应用时还需要试验或实践来确定或修正。

（2）试验法　对产品性能影响重大的某些配合，往往需用试验法来确定最佳间隙或最佳过盈。这种方法可靠性高，但因其需要进行大量的试验，成本较高。

（3）类比法　根据同类型机器或机构中，经过生产实践验证的已用配合的实际工作情况，再考虑所设计产品的使用要求，参照确定所需要的配合。

在实际生产当中，类比法是最常用的方法。分析零件的工作条件及使用要求，合理调整配合的间隙量与过盈量是选择配合的重要依据。要用好此种方法，首先需要在分析与掌握机器或机构的功能要求、工作条件及技术要求的基础上，分析、研究所设计零件的具体工作条件和使用要求。例如：必须充分考虑工作时结合件的相对位置状态（如运动速度、运动方向、停歇时间、运动精度要求等）、承受载荷情况、润滑条件、温度变化、配合的重要性、装卸条件以及材料的物理机械性能等。当待选部位和类比的典型实例在工作条件上有所变化时，应对配合的松紧程度做适当的调整。具体调整参见表 2-16。

表 2-16 根据工作情况对过盈或间隙的调整

具体情况	过盈应增大或减小	间隙应增大或减小
材料许用应力小	减小	—
经常拆卸	减小	—
工作时，孔的温度高于轴的温度	增大	减小
工作时，轴的温度高于孔的温度	减小	增大
有冲击载荷	增大	减小
配合长度较大	减小	增大
配合面几何误差大	减小	增大
装配时可能歪斜	减小	增大
旋转速度高	减小	增大
有轴向运动	—	增大
润滑油黏度增大	—	增大
润滑油黏度减小	—	减小
装配精度高	减小	减小
表面粗糙度数值大	增大	减小

其次，要理解和掌握各种配合的特性和应用。

间隙配合的特性是具有间隙，主要用于结合件有相对运动的配合。基本偏差代号当中的 d、e 和 f 主要用于形成液体摩擦的旋转运动，g 和 h 用于滑动或定位配合。

过盈配合的特性是具有过盈，主要用于结合件间无相对运动且不需要拆卸的静止连接。当过盈量较小时，仅作为精确定心用，如需传递力矩需加键、销等紧固件。过盈量较大时，可直接用于传递力矩。

过渡配合可能具有间隙，也可能具有过盈，因其间隙或过盈量小，主要用于精确定心、结合件间无相对运动、可拆卸的静止连接。要传递力矩时则要紧固件。

表 2-17 是轴的基本偏差的特性及应用说明，表 2-18 是优先配合的配合特性和应用说明，可以在选择公差带和配合时作为参考。

表 2-17 轴的基本偏差选用说明

配合	基本偏差	特性及应用
间隙配合	a，b	可得到特别大的间隙，应用很少
	c	可得到很大的间隙，一般适用于缓慢、松弛的动配合，用于工作条件较差（如农业机械）、受力变形，或为了便于装配，而必须保证有较大的间隙时。推荐配合为 H11/c11，其较高等级的 H8/c7 配合，适用于轴在高温工作的紧密动配合，如内燃机排气阀和导管

（续）

配合	基本偏差	特性及应用
间隙配合	d	一般用于 IT7 ~ 11 级。适用于松的转动配合，如密封盖、滑轮、空转带轮等与轴的配合，也适用于大直径滑动轴承配合，如透平机、球磨机和重型弯曲机，以及其他重型机械中的一些滑动轴承
	e	多用于 IT7、8、9 级。通常用于要求有明显间隙、易于转动的轴承配合，如大跨距轴承、多支点轴承等配合，高等级的 e 轴适用于大的、高速、重载支承，如涡轮发电机、大型电动机及内燃机主要轴承、凸轮轴轴承等配合
	f	多用于 IT6、7、8 级的一般转动配合，当温度影响不大时，被广泛用于普通润滑油（或润滑脂）润滑的支承，如齿轮箱、小电动机、泵等的转轴与滑动轴承的配合
	g	配合间隙很小，制造成本高，除很轻载荷的精密装置外，不推荐用于转动配合。多用于 IT5、6、7 级，最适合不回转的精密滑动配合，也用于插销等定位配合，如精密连杆轴承、活塞及滑阀、连杆销等
	h	多用于 IT4 ~ 11 级。广泛用于无相对转动的零件，作为一般的定位配合。若没有温度、变形影响，也用于精密滑动配合
过渡配合	js	偏差完全对称（ ± IT/2）、平均间隙较小的配合，多用于 IT4 ~ 7 级，要求间隙比 h 轴小，并允许略有过盈的定位配合。如联轴器、齿圈与钢制轮毂，可用木锤装配
	k	平均间隙接近于零的配合，适用于 IT4 ~ 7 级，推荐用于稍有过盈的定位配合。如为消除振动用的定位配合，一般用木锤装配
	m	平均过盈较小的配合，适用于 IT4 ~ 7 级。一般可用木锤装配，但在最大过盈时，要求相当的压入力
	n	平均过盈比 m 轴大，很少得到间隙，适用于 IT4 ~ 7 级，用锤或压入机装配，通常推荐用于紧密的组件配合，H6/n5 配合时为过盈配合
过盈配合	p	与 H6 或 H7 配合时是过盈配合，与 H8 孔配合时则为过渡配合。对非铁类零件，为较轻的压入配合。当需要时易于拆卸，对钢、铸铁件或铜、钢组件装配是标准压入配合
	r	对铁类零件为中等打入配合，对非铁类零件，为轻打入的配合，当需要时可以拆卸。与 H8 孔配合，直径在 100mm 以上时为过盈配合，直径小时为过渡配合
	s	用于钢和铁制零件的永久性和半永久性装配，可产生相当大的结合力。当用弹性材料（如轻合金）时，配合性质与铁类零件的 p 轴相当。如套环压装在轴上、阀座等的配合，尺寸较大时，为了避免损伤配合表面，需用热胀或冷缩法装配
	t	过盈较大的配合。对钢和铸铁零件适于做永久性结合，不用键可传递力矩，需用热胀或冷缩法装配，如联轴器与轴的配合
	u	这种配合过盈大，一般应验算在最大过盈时，工件材料是否损坏，要用热胀或冷缩法装配，如火车轮毂和轴的配合
	v，x y，z	这些基本偏差所组成配合的过盈量更大，目前使用的经验和资料还很少，须经试验后才能应用。一般不推荐

表 2-18 优先配合选用说明

优先配合		说明
基孔制	基轴制	
H11/C11	C11/h11	间隙非常大，用于很松、转动很慢的动配合；要求大公差与大间隙的外露组件；要求装配方便的很松的配合
H9/d9	D9/h9	间隙很大的自由转动配合，用于精度非主要要求时，或有大的温度变化、高转速或大的轴颈压力时的配合
H8/f7	F8/h7	间隙不大的转动配合，用于中等转速与中等轴颈压力的精确转动；也用于装配较易的配合
H7/g6	G7/h6	间隙很小的滑动配合，用于不希望自由转动，但可自由移动和滑动并精密定位的配合；也可用于要求明确的定位配合
H7/h6 H8/h7 H9/h9 H11/h11	H7/h6 H8/h7 H9/h9 H11/h11	均为间隙定位配合，零件可自由装拆，而工作时一般相对静止不动。在最大实体条件下的间隙为零，在最小实体条件下的间隙由公差等级决定
H7/k6	K7/h6	过渡配合，用于精密定位的配合
H7/n6	N7/h6	过渡配合，允许有较大过盈的更精密定位的配合
H7/p6	P7/h6	过盈定位配合，即小过盈配合，用于定位精度特别重要时，能以最好的定位精度达到部件的刚性及对中性要求，而对内孔承受压力无特殊要求，不依靠配合的紧固性传递摩擦载荷的配合
H7/s6	S7/h6	中等压入配合，适用于一般钢件，或用于薄壁件的冷缩配合，用于铸铁件可得到最紧的配合
H7/u6	U7/h6	压入配合，适用于可以承受高压入力的零件，或不宜承受大压入力的冷缩配合

【例 2-6】 通过试验和相应计算，确定铝制活塞与钢制缸体的装配间隙为 0.512～0.726mm，活塞与缸体的公称尺寸为 150mm，试根据装配间隙确定合适的配合。

解：（1）确定活塞与缸体配合的基准制　依据基准制的选择原则，优先选用基孔制配合，所以缸体孔的基本偏差代号为“H”。

（2）确定活塞与缸体的公差等级　配合公差为

$$T_f = X_{max} - X_{min} = 0.726\text{mm} - 0.512\text{mm} = 0.214\text{mm}$$

若活塞轴与缸体孔的公差等级相同，则它们的公差值 T 应为

$$T = T_f/2 = 0.214\text{mm}/2 = 0.107\text{mm}$$

查表 2-6 得：IT9 = 0.100mm 与计算结果相近。根据公差等级的选用原则，确定孔、轴的公差等级为 IT9，且：

$$IT9 + IT9 = 0.100mm + 0.100mm = 0.200mm < 0.214mm$$

至此，缸体孔的公差带代号为 150H9，极限偏差分别为：EI = 0，ES = +0.100mm。由配合的极限间隙绘出活塞轴与缸体孔的公差带图（见图 2-23），从图中可见，非标准件的基本偏差为上极限偏差，其数值为 -0.512mm，查表 2-9 得活塞轴的基本偏差代号为“a”时，公差带代号为 150a9。

图 2-23　活塞轴与缸体孔的公差带图

$$es = -0.520mm$$

$$ei = es - IT7 = -0.520mm - 0.100mm = -0.620mm$$

此时，配合的极限间隙应为

$$X_{max} = ES - ei = 0.100mm + 0.620mm = +0.720mm < +0.726mm$$

$$X_{min} = EI - es = 0 + 0.520mm = +0.520mm > +0.512mm$$

验算合格，所以活塞轴与缸体孔的配合选择为 150H9/a9。

2.5　一般公差

构成零件的所有要素总是具有一定的尺寸和几何形状。由于尺寸误差和几何特征（形状、方向、位置）误差的存在，为保证零件的使用功能就必须对它们加以限制。因此，零件在图样上表达的所有要素都有一定的公差要求。

一般公差（GB/T 1084—2000）是指在车间通常加工条件下可保证的公差，是机床设备在正常维护和操作情况下，能达到的经济加工精度。对功能上无特殊要求的要素可给出一般公差。采用一般公差时，在该尺寸后不标注极限偏差或其他代号，所以也称未注公差。

一般公差可应用在线性尺寸、角度尺寸、形状和位置等几何要素，主要用于较低精度的非配合尺寸。当功能上允许的公差等于或大于一般公差时，均应采用一般公差；当要素的功能允许比一般公差大的公差，且注出更为经济时（如装配所钻不通孔的深度），则相应的极限偏差值要在尺寸后注出。

一般公差适用于金属切削加工的尺寸，也适用于一般的冲压加工的尺寸，非金属材料和其他工艺方法加工的尺寸可参照采用。该标准仅适用于下列未注公差的尺寸：线性尺寸（例如外尺寸、内尺寸、阶梯尺寸、直径、半径、距离、倒圆半径和倒角高度）；角度尺寸。

一般公差规定了四个公差等级，即精密级、中等级、粗糙级和最粗级。其中：线性尺寸一般公差的公差等级及其极限偏差数值见表 2-19；倒圆半径与倒角高度尺寸一般公差的公差等级及其极限偏差数值见表 2-20；未注公差角度尺寸的极限偏差见表 2-21。

选取图样上未注公差尺寸的公差等级时，应考虑通常的车间精度，并由相应

的技术文件或标准做出具体规定。采用 GB/T 1804—2000 规定的一般公差，应在图样标题栏附近或技术要求、技术文件（如企业标准）中，用标准号及公差等级代号表示。例如，选取中等级时标注为

GB/T 1804—2000—m

采用一般公差的尺寸在正常车间精度保证的条件下，一般可不检验。因零件功能允许的公差常常是大于一般公差，所以当工件任一要素超出（偶然地超出）一般公差时，通常不会损害零件的功能。因此，超出一般公差的工件如未达到损害其功能时，通常不应判定拒收（另有规定除外）。只有当零件的功能受到损害时，超出一般公差的工件才能被拒收。

表 2-19　线性尺寸一般公差的公差等级及其极限偏差数值

公差等级	基本尺寸分段/mm							
	0.5～3	>3～6	>6～30	>30～120	>120～400	>400～1000	>1000～2000	>2000～4000
精密 f	±0.05	±0.05	±0.1	±0.15	±0.2	±0.3	±0.5	—
中等 m	±0.1	±0.1	±0.2	±0.3	±0.5	±0.8	±1.2	±2
粗糙 c	±0.2	±0.3	±0.5	±0.8	±1.2	±2	±3	±4
最粗 v	—	±0.5	±1	±1.5	±2.5	±4	±6	±8

表 2-20　倒圆半径与倒角高度尺寸一般公差的公差等级及其极限偏差数值

公差等级	基本尺寸分段/mm			
	0.5～3	>3～6	>6～30	>30
精密 f	±0.2	±0.5	±1	±2
中等 m				
粗糙 c	±0.4	±1	±2	±4
最粗 v				

注：倒圆半径和倒角高度的含义参见 GB/T 6403.4。

表 2-21　未注公差角度尺寸的极限偏差数值

公差等级	长度分段/mm				
	～10	>10～50	>50～120	>120～400	>400
精密 f	±1°	±30′	±20′	±10′	±5′
中等 m					
粗糙 c	±1°30′	±1°	±30′	±15′	±10′
最粗 v	±3°	±2°	±1°	±30′	±20′

2.6 配制配合

2.6.1 配制配合的基本概念

配制配合是以一个零件的实际尺寸为基数，来配制另一个零件的一种工艺措施，一般用于公差等级较高、单件小批生产的配合零件。

当公称尺寸 >500mm 时，若采用互换性生产零件，通常会因为零件的公差等级较高、尺寸较大，使产品的加工困难。因此，除采用互换性生产外，还可以根据制造特点采用配制配合。是否采用配制配合，由设计人员根据零件生产使用情况来决定。

2.6.2 对配制配合零件的基本要求

1）先按互换性生产选取配合，配制的结果应满足此配合公差。

2）一般选择较难加工，但能得到较高测量精度的那个零件（在多数情况下是孔）作为先加工件，给它一个比较容易达到的公差或按线性尺寸的一般公差（未注公差）加工。

3）配制件（多数情况下是轴）的公差可按所定的配合公差来选取。因为配合公差等于孔公差与轴公差的和，所以，配制件的公差比采用互换性生产时单个零件的公差要大，配制件的加工精度要求降低，容易达到现在的尺寸加工精度要求。配制件的偏差和极限尺寸以先加工件的实际尺寸为基数来确定。

4）由于配制件的偏差和极限尺寸以先加工件的实际尺寸为基数来确定的，所以，测量对保证原设计的配合性质有很大关系，要注意温度、形状和位置误差对测量结果的影响。配制配合应采用尺寸相互比较的测量方法。在同样条件下测量，使用同一基准装置或校对量具，由同一组计量人员进行测量，以提高测量精度。

5）配制配合是关于尺寸极限方面的技术规定，不涉及其他技术要求，如零件的形状和位置公差、表面粗糙度等，不因采用配制配合而降低。

2.6.3 配制配合在图样上的标注方法

用代号 MF（Matched Fit）表示配制配合，借用基准孔的代号 H 或基准轴的代号 h 表示先加工件。在装配图和零件图的相应部位均应标出。装配图上还要标明按互换性生产时的配合要求。

举例：公称尺寸为 ϕ3000mm 的孔和轴，要求配合的最大间隙在 +0.14 ~ +0.45mm之间，按互换性生产可选用基孔制配合 ϕ3000H6/f6 或基轴制配合 ϕ3000F6/h6，其最大间隙为 0.415mm，最小间隙为 0.145mm，可满足使用要求。由于公称尺寸 3000mm 较大，且为 IT6 级公差，按互换性生产难度较大，现确定采

用配制配合，其标注方法为：

a）在装配图上标注为

$$\phi 3000\mathrm{H6/f6MF}$$（先加工件为孔）

或　$$\phi 3000\mathrm{F6/h6MF}$$（先加工件为轴）

b）若先加工件为孔，给一个较容易达到的公差，例如 H8，在零件图上标注为

$$\phi 3000\mathrm{H8MF}$$

若按“线性尺寸的未注公差”加工，则标注为

$$\phi 3000\mathrm{MF}$$

c）配制件为轴，根据已确定的配合公差选取合适的公差带，例如 f7，此时其最大间隙为 0.355mm，最小间隙为 0.145mm，图上标注为

$$\phi 3000\mathrm{f7MF} \quad 或 \quad \phi 3000^{-0.145}_{-0.355}\mathrm{MF}$$

2.6.4　配制件极限尺寸的计算

在上面的例子中，用尽可能准确的测量方法测出先加工工件（孔）的实际尺寸，例如为 $\phi 3000.195$mm，则配制件（轴）的极限尺寸计算如下：

$$上极限尺寸 = 3000.195\mathrm{mm} - 0.145\mathrm{mm} = 3000.050\mathrm{mm}$$

$$下极限尺寸 = 3000.195\mathrm{mm} - 0.355\mathrm{mm} = 2999.840\mathrm{mm}$$

自测习题二

1. 判断下列说法是否正确，并分析原因。

1）一般来说，零件的实际尺寸越接近公称尺寸，该零件的加工精度越高。（　　）

2）尺寸公差必须大于零。（　　）

3）孔和轴的加工精度越高，则其配合精度也越高。（　　）

4）过渡配合的特性是可能形成间隙，也可能形成过盈，因此过渡配合可能是间隙配合，也可能是过盈配合。（　　）

5）若某配合的最大间隙为 15μm，配合公差为 41μm，则该配合一定是过渡配合。（　　）

6）孔的尺寸减去轴的尺寸的代数差小于零，称为过盈，过盈量越大，配合越紧。（　　）

7）改变公差带的位置，可以改变配合的松紧程度，进而改变配合的精度。（　　）

2. 填空题。

1）基本偏差代号为 s 的轴的公差带与基准孔 H 配合，将形成（　　　）。

2）选择基准制时，应优先选用（　　　），其理由是（　　　）。

3）配合的种类有（　　　）、（　　　）、（　　　）。

4）标准公差大小取决于（　　　）和（　　　）两个因素。

3. 选择题。

1）下列配合中（　　）的配合最紧，（　　）的配合最松。

A. H7/g6　　B. JS7/h6　　C. H7/s6　　D. H7/h6

2）比较两尺寸精度高低的依据是（　　）。

A. 基本偏差　　B. 公差数值　　C. 公差等级　　D. 尺寸大小

3）下列配合中配合性质相同的是（　　）和（　　）。

A. ϕ30H7/g6 和 ϕ30G7/h6　　B. ϕ30H7/r6 和 ϕ30R7/h7

C. ϕ30H8/f8 和 ϕ30F8/h8　　D. ϕ30K6/h6 和 ϕ30H6/k6

4）零件尺寸的极限偏差是（　　）。

A. 测量得到的　　B. 加工后形成的　　C. 设计时给定的

4. 简答题。

1）以基孔制为例，简要说明各类配合的应用。

2）一个孔的直径为 $\phi40 \pm 0.005$，那么孔的合格尺寸的条件是什么？

3）某孔尺寸为 $\phi45 \pm 0.004$，求其上极限偏差、下极限偏差和公差。

5. 查表确定下列公差带的极限偏差，并绘出公差带图。

1）ϕ50k6　　2）ϕ40m5　　3）ϕ30M7　　4）ϕ80JS8

6. 查表确定下列各尺寸的公差带的代号，计算配合的极限间隙或极限过盈及配合公差，并绘出公差带图。

1）孔：$\phi45^{+0.007}_{-0.018}$　　轴：$\phi45^{0}_{-0.016}$

2）孔：$\phi30^{+0.330}_{0}$　　轴：$\phi30^{-0.020}_{-0.041}$

3）孔：$\phi60^{+0.030}_{0}$　　轴：$\phi60^{+0.060}_{+0.041}$

7. 有下列三组孔与轴配合，试根据给定的数值，确定孔和轴的公差等级，并选用适当的配合。

1）公称尺寸 = 20mm，配合间隙要求在 +0.02 ~ +0.086mm 之间。

2）公称尺寸 = 35mm，配合过盈要求在 −0.076 ~ −0.035mm 之间。

3）公称尺寸 = 75mm，配合的最大间隙为 +0.046mm，最大过盈为 −0.032mm。

8. 经试验确定发动机的工作间隙在 0.04 ~ 0.098mm 时工作效果良好，正

常工作时，活塞的工作温度为150℃，汽缸温度为100℃，活塞的线膨胀系数为22×10^{-6}℃$^{-1}$，汽缸的线膨胀系数为12×10^{-6}℃$^{-1}$。活塞与汽缸的公称尺寸为100mm，装配温度为20℃，试计算活塞与汽缸的装配间隙，并根据装配间隙确定合适的活塞轴与汽缸孔的极限偏差及其配合。

第3章 长度测量基础

3.1 概述

经过机械加工以后的零部件是否符合设计图样的技术要求，必须通过技术测量才能进行判断。机械制造中的技术测量是指几何参数（包括长度、角度、几何误差、表面粗糙度等）的测量。本章主要介绍技术测量的基础知识，包括测量基准、测量尺寸传递系统和测量方法、测量误差的分析和测量数据的处理方法等。

在机械制造中，技术测量主要是指对零件的几何量（包括长度、角度、表面粗糙度、几何形状和相互位置精度等）进行测量，以确定零部件加工后是否符合设计图样上的技术要求。

检测是检验与测量的总称。检验是以确定被测量是否达到预期要求所进行的操作。测量则是以确定量值为目的的一组操作。

在测量中假设 L 为被测量，E 为所采用的计量单位，那么它们的比值为

$$q = \frac{L}{E} \tag{3-1}$$

在被测量 L 一定的情况下，比值 q 的大小取决于所采用的计量单位 E。计量单位 E 越小，比值 q 越大，说明计量单位的选择决定于被测量所要求的准确程度，经比较而得的被测量为

$$L = qE$$

由测量的定义可知，任何一个测量过程必须有被测的对象和所采用的计量单位，还有被测量与计量单位是如何怎样进行比较及比较的准确程度，即测量的方法和测量的准确度。因此，一个完整的测量过程应包括测量对象、计量单位、测量方法及测量准确度四个要素。

（1）测量对象　主要指几何量，包括长度、角度、几何形状、位置以及表面粗糙度等。

（2）计量单位　1984 年 2 月 27 日正式公布中华人民共和国法定计量单位，确定米制为我国的基本计量制度。在长度测量中单位为米（m），其他常用单位

有毫米（mm）和微米（μm）。在角度测量中以度（°）、分（′）、秒（″）为单位。

（3）测量方法　是指在进行测量时所用的按类叙述的一组操作逻辑次序。对几何量的测量而言，则是根据被测参数的特点，如公差值、大小、轻重、材质、数量等，并分析研究该参数与其他参数的关系，最后确定对该参数如何进行测量的操作方法。

（4）测量准确度　测量结果与被测量真值之间的一致程度。由于任何测量过程中不可避免地会出现测量误差，所以，任何测量结果都是被测量的近似值。

3.2　长度基准与尺寸传递

国际上统一使用的公制长度基准是米，米的定义为光在真空中1/299 792 458s时间间隔内的行程长度。在实际工作中不能直接使用光波作为长度基准进行测量，在用各种测量器具（仪器）进行测量时，为了保证量值统一，必须把长度基准的量值准确地传递到所使用的计量器具和被测工件上。目前在实际工作中使用下述两种实体基准：线纹尺和量块。长度基准的量值传递系统如图3-1所示。

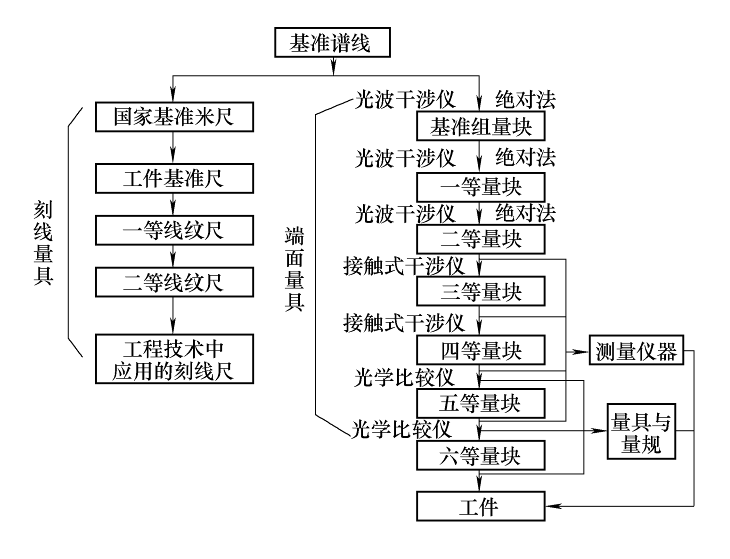


图3-1　长度基准的量值传递系统

3.2.1　长度量块及其传递系统

长度量块是其横截面为矩形或圆形的一对相互平行测量面间具有准确尺寸的测量器具。长度量块用耐磨材料制造，量块的测量面可以和另一量块的测量面相研合而组合使用，也可以和具有类似表面质量的辅助体表面相研合而用于量块长

度的测量。

长度量块是精密测量中经常使用的标准器，在极限制造和仪器制造中应用广泛。在长度计量中作为实物标准，用以体现测量单位，并作为尺寸传递的媒介。此外，量块还广泛用于检定和校准计量器具；比较测量中用于调整仪器的零位；也可用于加工中机床的调整和工件的检验等。

长度量块的形状为长方形平面六面体（见图 3-2），它有两个测量面（上测量面与下测量面）和四个非测量面（见图 3-2、图 3-3）。

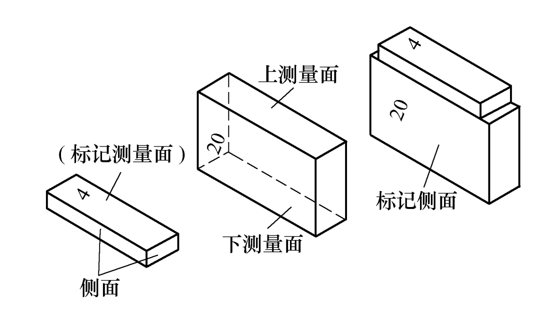


图 3-2　量块

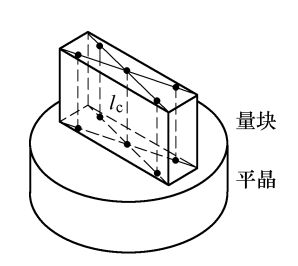


图 3-3　量块下测量面与平晶研合

1. 长度量块尺寸方面的术语

（1）量块长度 l　量块一个测量面上的任意点到与其相对的另一测量面相研合的辅助体表面之间的垂直距离，辅体的材料和表面质量应与量块相同。

（2）量块中心长度 l_c　对应于量块未研合测量面中心点的量块长度。

（3）量块标称长度 l_n　标记在量块上用以表明其与主单位（m）之间关系的量值，也称为量块长度的示值。

（4）量块长度变动量 V　量块测量面上任意点中的最大长度与最小长度之差。

2. 长度量块分级

按照 GB/T 6093—2001 规定，根据量块长度极限偏差、量块长度变动允许值、测量面的平面度、量块的研合性以及测量面的粗糙度等，量块按其制造精度分为 5 级，即 K 级、0 级、1 级、2 级、3 级，其中 K 级为校准级，用来校准 0 级、1 级、2 级量块。

3. 长度量块的分等

量块按检定精度分为 1 ~6 等，其中 1 等精度最高，6 等精度最低。

量块可以按“级”使用或按“等”使用，当量块按等使用时，是以量块检定书列出的实测中心长度为工作尺寸，该尺寸只包含检定时较小的测量误差。因此，量块按“等”使用比按“级”使用的测量精度高。

表 3-1 和表 3-2 分别列出了量块按级或按等划分时有关的技术要求的部分数值。

表 3-1 各级量块的精度指标（GB/T 6093—2001）

标称长度 l_n/mm	K 级		0 级		1 级		2 级		3 级	
	量块测量面上任意点长度相对于标称长度的极限偏差 $\pm t_e$	量块长度变动量最大允许值 t_v	量块测量面上任意点长度相对于标称长度的极限偏差 $\pm t_e$	量块长度变动量最大允许值 t_v	量块测量面上任意点长度相对于标称长度的极限偏差 $\pm t_e$	量块长度变动量最大允许值 t_v	量块测量面上任意点长度相对于标称长度的极限偏差 $\pm t_e$	量块长度变动量最大允许值 t_v	量块测量面上任意点长度相对于标称长度的极限偏差 $\pm t_e$	量块长度变动量最大允许值 t_v
	μm									
$l_n \leqslant 10$	0.20	0.05	0.12	0.10	0.20	0.16	0.45	0.30	1.00	0.50
$10 < l_n \leqslant 25$	0.30	0.05	0.14	0.10	0.30	0.16	0.60	0.30	1.20	0.50
$25 < l_n \leqslant 50$	0.40	0.06	0.20	0.10	0.40	0.18	0.80	0.30	1.60	0.55
$50 < l_n \leqslant 75$	0.50	0.06	0.25	0.12	0.50	0.18	1.00	0.35	2.00	0.55
$75 < l_n \leqslant 100$	0.60	0.07	0.30	0.12	0.60	0.20	1.20	0.35	2.50	0.60
$100 < l_n \leqslant 150$	0.80	0.08	0.40	0.14	0.80	0.20	1.60	0.40	3.00	0.65
$150 < l_n \leqslant 200$	1.00	0.09	0.50	0.16	1.00	0.25	2.00	0.40	4.00	0.70
$200 < l_n \leqslant 250$	1.20	0.10	0.60	0.16	1.20	0.25	2.40	0.45	5.00	0.75
$250 < l_n \leqslant 300$	1.40	0.10	0.70	0.18	1.40	0.25	2.80	0.50	6.00	0.80
$300 < l_n \leqslant 400$	1.80	0.12	0.90	0.20	1.80	0.30	3.60	0.50	7.00	0.90
$400 < l_n \leqslant 500$	2.20	0.14	1.10	0.25	2.20	0.35	4.40	0.60	9.00	1.00
$500 < l_n \leqslant 600$	2.60	0.16	1.30	0.25	2.60	0.40	5.00	0.70	11.00	1.10
$600 < l_n \leqslant 700$	3.00	0.18	1.50	0.30	3.00	0.45	6.00	0.70	12.00	1.20
$700 < l_n \leqslant 800$	3.40	0.20	1.70	0.30	3.40	0.50	6.50	0.80	14.00	1.30
$800 < l_n \leqslant 900$	3.80	0.20	1.90	0.35	3.80	0.50	7.50	0.90	15.00	1.40
$900 < l_n \leqslant 1\,000$	4.20	0.25	2.00	0.40	4.20	0.60	8.00	1.00	17.00	1.50

注：距离测量面边缘0.8mm 范围内不计。

表 3-2 各等量块的精度指标（JJG 146—2011）

标称长度 l_n/mm	1 等		2 等		3 等		4 等		5 等	
	测量不确定度	长度变动量	测量不确定度	长度变动量	测量不确定度	长度变动量	测量不确定度	长度变动量	测量不确定度	长度变动量
	最大允许值/μm									
$l_n \leqslant 10$	0.022	0.05	0.06	0.10	0.11	0.16	0.22	0.30	0.6	0.50
$10 < l_n \leqslant 25$	0.025	0.05	0.07	0.10	0.12	0.16	0.25	0.30	0.6	0.50
$25 < l_n \leqslant 50$	0.030	0.06	0.08	0.10	0.15	0.18	0.30	0.30	0.8	0.55
$50 < l_n \leqslant 75$	0.035	0.06	0.09	0.12	0.18	0.18	0.35	0.35	0.9	0.55
$75 < l_n \leqslant 100$	0.040	0.07	0.10	0.12	0.20	0.20	0.40	0.35	1.0	0.60
$100 < l_n \leqslant 150$	0.05	0.08	0.12	0.14	0.25	0.20	0.5	0.40	1.2	0.65
$150 < l_n \leqslant 200$	0.06	0.09	0.15	0.16	0.30	0.25	0.6	0.40	1.5	0.70
$200 < l_n \leqslant 250$	0.07	0.10	0.18	0.16	0.35	0.25	0.7	0.45	1.8	0.75
$250 < l_n \leqslant 300$	0.08	0.10	0.20	0.18	0.40	0.25	0.8	0.50	2.0	0.80

4. 量块的尺寸组合

量块是单值量具，一个量块只有一个尺寸。为得到所需要的长度标准量，可以利用量块的研合性，用多个尺寸不同的量块研合来实现。为保证精度，研合时量块的数量一般不超过4块。量块的尺寸组合一般采用消尾法，即每选一块量块应消去一位尾数。例如尺寸36.725mm使用83块套的4块量块组合为：36.925 = 1.005 + 1.42 + 4.5 + 30。91块和83块成套量块的组合尺寸见表3-3。

表3-3 91块和83块成套量块的组合尺寸（摘自GB/T 6093—2001）

套别	总块数	级别	尺寸系列/mm	间隔/mm	块数
1	91	0，1	0.5	—	1
			1	—	1
			1.001，1.002，…，1.009	0.001	9
			1.01，1.02，…，1.49	0.01	49
			1.5，1.6，…，1.9	0.1	5
			2.0，2.5，…，9.5	0.5	16
			10，20，…，100	10	10
2	83	0，1，2	0.5	—	1
			1	—	1
			1.005	—	1
			1.01，1.02，…，1.49	0.01	49
			1.5，1.6，…，1.9	0.1	5
			2.0，2.5，…，9.5	0.5	16
			10，20，…，100	10	10

3.2.2 角度基准

角度也是机械制造中重要的几何参数之一。在计量部门，常以分度盘或多面棱体作为角度度量的基准。目前生产的多面棱体有4、6、8、12、24、36、72面等。图3-4所示为八面棱体，在任一横切面上其相邻两面法线间的夹角 α 为45°。用它作角度基准可以测 $n \times 45°$ 的角度（$n = 1、2、3、\cdots$）。

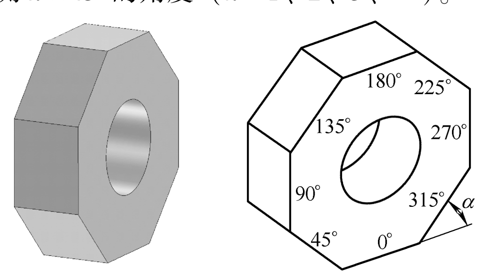


图3-4 八面棱体

3.3 几何量测量器具与测量方法的分类

3.3.1 几何量测量器具的分类

几何量测量器具（简称测量器具）是可单独地或与其他装置一起，用以确定几何量值的器具。

几何量测量器具包括长度测量器具、角度测量器具、几何误差测量器具、表面质量测量器具、齿轮测量器具、螺纹测量器具以及其他测量器具。

（1）长度测量器具　长度测量器具是通用于在平面内测量长度量的测量器具，包括量具类、卡尺类、千分尺类、指示表类。

量具类包括量块、光滑极限量规、塞尺、钢直尺、精密玻璃线纹尺、精密金属线纹尺、半径样板等。

卡尺类包括游标卡尺、带表卡尺、电子数显卡尺、深度游标卡尺、高度游标卡尺等。

千分尺类包括外径千分尺、杠杆千分尺、内径千分尺等。

指示表类包括指示表、深度指示表、杠杆指示表、内径指示表、涨簧式内径指示表、钢球式内径指示表、电子数显指示表、扭簧比较仪、杠杆齿轮比较仪、电子量规、电感式传感器、电感内径比较仪、瞄准传感器等。

（2）角度测量器具　角度测量器具是通用于在平面内测量角度量的测量器具，包括角度量块、正多面棱体、刀具角度样板、直角尺、方形角尺、万能角度尺、光学分度头、目镜式光学分度头、投影式光学分度头、多齿分度台、分度转台、正弦规、圆锥量规、直角尺测量仪等。

（3）几何误差测量器具　几何误差测量器具是专用于几何误差测量的测量器具，包括平晶、刀口形直尺、刀口尺、三棱尺、四棱尺、平尺、平板、方箱、水准器式水平仪、平直度测量仪、圆度测量仪等。

（4）表面质量测量器具　表面质量测量器具是专用于测量表面粗糙度、波纹度等表面几何参数值的测量器具，包括表面粗糙度比较样块、便携式表面粗糙度测量仪、台式表面粗糙度测量仪等。

（5）齿轮测量器具　齿轮测量器具是专用于测量齿轮及齿轮刀具几何参数值的测量器具。齿轮测量专用器具类包括测量齿轮、测量齿条、测量蜗杆、渐开线样板、螺旋线样板、齿厚游标卡尺、公法线千分尺、正切齿厚规等。

单项误差测量仪类包括便携式齿轮齿距测量仪、齿轮基节测量仪、齿轮跳动测量仪、齿轮螺旋角测量仪、齿轮导程测量仪等。

万能式齿形测量仪包括万能测齿仪、齿轮齿向测量仪、齿轮齿距测量仪、万能渐开线螺旋线测量仪、齿轮测量机、蜗轮测量仪等。

综合误差测量仪类包括圆柱齿轮双面啮合综合测量仪、齿轮单面啮合整体误差测量仪、齿轮测量中心等。

（6）螺纹测量器具　螺纹测量器具是专用于测量螺纹几何参数值的测量器具，包括螺纹样板、量针、螺纹量规、螺纹千分尺、丝杠静态测量仪、丝杠动态测量仪等。

3.3.2　测量方法及其分类

测量方法是进行测量时所用的，按类别叙述的一组操作的逻辑次序。在具体实施测量的工作中，应按照测量程序进行。

测量程序是进行特定测量时所用的，根据给定的测量方法具体叙述的一组操作。测量程序通常记录在被称为“测量程序”（或测量方法）的文件中，并且足够详尽，不需补充材料，即可完成一次测量操作。

几何量测量中，可按测量方法的不同特征进行分类。

（1）直接测量法　不必测量与被测量有函数关系的其他量而能直接得到被测量值的测量方法。直接测量法又可以分为绝对测量与相对测量。绝对测量是指在计量器具的读数装置上可表示出被测量的全值的测量。例如，用游标卡尺测量零件的直径。相对测量又称比较测量，在计量器具的读数装置上只表示出被测量相对已知标准量的偏差值。由于标准量是已知的，因此被测量的全值即读数装置所指示的偏差值与标准量的代数和。例如，用经过量块调整的比较仪测量零件的直径。

（2）间接测量法　通过测量与被测量有函数关系的其他量来得到被测量值的测量方法。例如，在测量大尺寸圆柱形零件的直径 D 时，可以先量出其圆周长度 L，然后通过关系式 $D=L/\pi$ 求得零件的直径 D。

（3）单项测量　单项测量是指分别测量零件的各个参数。例如，分别测量齿轮的齿厚、齿形、齿距，分别测量螺纹的实际中径、螺距、半角等。

（4）综合测量　综合测量是指同时测量零件几个相关参数的综合效应或综合参数。例如，齿轮的综合测量、螺纹的综合测量等。

综合测量一般效率较高，对保证零件的互换性更为可靠，常用于完工零件的检验。单项测量能分别确定每一被测参数的误差，一般用于刀具与量具的测量、废品分析以及工序检验等。

（5）接触测量　接触测量是指仪器的测量头与被测零件表面直接接触，并有机械作用的测量力存在的测量。接触形式有点接触（如用球形测头测平面）、线接触（如用平面测头测外圆柱体直径）及面接触（如用平面测头测平面）。

（6）非接触测量　非接触测量是指仪器的测量头与被测零件之间没有机械作用的测量力存在的测量。例如，光学投影测量、气动测量等。

接触测量对零件表面油污、切削液及微小振动等不是很敏感。但由于有测量

力，会引起零件表面、测量头和量仪传动系统的弹性变形，测量头的磨损，以及零件表面被划伤等问题。

（7）在线测量　在线测量是指零件加工过程中进行的测量。此时，直接用测量结果来控制零件的加工过程，决定是否需要继续加工或调整机床，故能及时有效地避免废品的产生。在线测量能使技术测量与加工工艺以最密切的形式结合起来，因此，有利于充分发挥技术测量的积极作用。

（8）离线测量　离线测量是指零件加工完成后进行的测量。此时，测量结果主要用于发现并剔出废品。

（9）静态测量　确定可以认为不随时间变化的量值的测量。

（10）动态测量　确定随时间变化量值的瞬间量值的测量。

3.4　几何量测量常用术语

（1）几何量与量值　几何量是指几何学中具有空间位置、形状与大小的量。

量值是指一般由一个数乘以测量单位表示特定量的大小。例如：5.34m、0.633μm 或 633nm、15kg、10s、－40℃。

（2）真值与约定真值　真值是指与给定的特定量的定义一致的值。真值只有通过完善的测量才有可能获得。

约定真值是为某一给定目的，被赋予特定量的值，该值有时被约定采用并具有适当不确定度。例如：米的定义（光在真空中 1/299 792 458s 内经过的距离为 1m）；在给定位置，通过参考标准复现的量所指定的值可以作为约定真值；通常用某量的多次测量结果来确定一个约定真值。

（3）基准　为了定义、实现、保存和复现量的单位或一个或多个量值，而用作为参考的实物量具、测量仪器、参考物质或测量系统。例如，标准量块、1kg 质量标准、100Ω 标准电阻等。

（4）测量结果　由测量所得到的并赋予被测量的量值。在给出测量结果时，应说明它是示值、未修正测量结果或已修正测量结果，还应表明是否是几个值的平均。在测量结果的完整表达中应包括测量不确定度，必要时还应说明有关影响量的取值范围。

测量结果应当被理解为被测量值的最佳估计。

（5）示值　测量器具所给出的量的值。

（6）分度值　标尺分度所代表的量值，如千分表的分度值为 0.001mm、卡尺的分度值为 0.02mm。数显式仪器的分度值称为分辨率。一般来说，分度值越小，计量器具的精度越高。

（7）标尺间距　沿着标尺长度的同一条线测得的两相邻标尺标记之间的距离。标尺间距用长度单位表示，与被测量的单位或标注在标尺上的单位无关。

（8）量程　标称范围两极限值之差的绝对值。例如：对于 -10 ~ +10V 的标称范围，其量程为 20V。在有些知识领域，最大值和最小值之差称为范围。

（9）测量范围　是指测量器具的误差在规定极限内的一组被测量的值。

（10）灵敏度　测量仪器的响应变化除以相应的激励变化。灵敏度取决于激励值。

（11）鉴别力［阈］　使测量仪器的响应未产生可察觉变化的激励的最大变化，这种激励应在单向缓慢地产生。鉴别力阈可取决于噪声（内部的或外部的）等，也可取决于激励值。

（12）测量仪器准确度　测量仪器给出接近真值的响应的能力。

（13）稳定性　测量仪器保持其计量特性随时间恒定的能力。

（14）可靠性　测量器具在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力。

（15）响应时间　从激励受到规定的突变瞬间到获得规定响应瞬间的时间间隔。

（16）测量仪器［示值］误差　测量仪器的示值与对应输入量的真值之差。由于真值不能确定，实践中使用约定真值。对于实物量具，示值即赋予它的值。

（17）最大允许误差　对于测量器具，由技术规范、规程等允许的误差极限值。

（18）测量不确定度　与测量结果相联系的参数，表征可被合理地赋予被测量的量值的分散特性。

测量不确定度可以用标准偏差或标准偏差的倍数表示。测量不确定度一般由多个分量组成，其中一些分量可用测量列结果的统计分布估算，并用实验标准偏差表征。其他分量也可用标准偏差表征，可用基于经验或其他信息的假定概率分布估算。

（19）标准不确定度　以标准偏差表示的测量不确定度。

3.5　测量误差及数据处理

3.5.1　测量误差的基本概念

测量误差是指测得值与被测量真值之差，测量误差包括绝对误差和相对误差。

绝对误差是测量结果与被测量约定真值之差，可以用下式计算：

$$\delta = x - x_0 \tag{3-2}$$

式中　δ——绝对误差；

x——测得值；

x_0——被测量真值。

相对误差是测量的绝对误差与被测量真值之比，用 f 表示相对误差，则相对误

差的计算公式为

$$f = \frac{\delta}{x_0} \tag{3-3}$$

一般来说，被测量的真值是不知道的。在实际测量时，常用相对真值或不存在系统误差情况下的多次测量的算术平均值来代替真值使用。

3.5.2 测量误差产生的原因

为了提高测量的准确度，应该尽量减小测量误差。要减小测量误差，就要了解测量误差产生的原因。

（1）计量器具误差　它是指计量器具本身固有的误差，由计量器具设计、制造和使用调整的不准确而引起，与被测零件和外部测量条件无关。例如：在设计计量器具时，有时为了简化结构，采用近似设计而引起的误差；计量器具传动系统元件制造不准确所引起的放大比的误差；分度盘安置偏心而引起的误差等。

（2）基准件误差　它是指作为标准量的基准件本身存在的误差，如量块的制造误差等。

（3）测量方法误差　它是指由于测量方法不完善（包括计算公式不准确、测量方法的选择不当、测量时定位装夹不合理）而引起的误差。此外，若测量基准、测量头形状选择得不正确，也会引起测量误差。

（4）测量环境误差　它是指测量时的环境条件不符合标准条件所引起的误差。环境条件包括温度、湿度、气压、照明、振动及灰尘等。其中，温度对测量结果的影响最大，因此，要求精密测量（如三坐标测量机）的环境尽量保持恒温。

（5）人为误差　它是指由测量者的主观因素引起的误差，如由于测量人员技术不熟练、视力分辨能力差、估读判断不准等引起的误差。

总之，引起测量误差的原因很多，测量者分析误差时，应找出产生测量误差的主要原因，采取相应的措施，设法消除或减小其对测量结果的影响，保证测量的精度。

3.5.3 测量误差的分类

为了提高测量的精度，不仅要分析测量误差产生的原因，而且要分析测量误差的特征和规律，以便对测量数据进行正确的处理。测量误差按其性质可分为随机误差、系统误差及粗大误差三类。

（1）随机误差及其处理与评定　随机误差是在对同一被测量的多次测量过程中以不可知方式变化的测量误差的分量。

随机误差主要是由测量过程中的各种随机因素，例如，测量过程中的振动、测量力不稳定、对测量器具操作时对线、读数不一致等因素引起的。虽然在单次测量中，随机误差是无规律的，但是进行多次重复测量，该误差符合统计规律。

（2）系统误差及其发现与消除　系统误差是在对同一被测量的多次测量过程中保持恒定或以可预知方式变化的测量误差分量。

同一被测量的多次测量过程中保持恒定的系统误差又被称为定值系统误差。例如：用量块调整比较仪时，量块按“等”使用时所引起的测量误差；千分尺的零位不正确而引起的测量误差。

在对同一被测量的多次测量过程中以可预知方式变化的测量误差分量称为变值系统误差。例如，测量环境温度均匀变化所引起的测量误差。

从理论上讲，系统误差是可以消除的，特别是多数定值系统误差，通常都易于发现，并能够消除。但在实际测量时，系统误差不一定能够完全被消除，应设法发现并消除或减小系统误差。

现以射击打靶为例说明系统误差和随机误差的关系（见图 3-5）。图中最小的圆圈代表靶心，黑点代表弹孔。图 a 弹孔很分散，但弹孔的分布中心靠近靶心，表明随机误差大，系统误差小，即精密度低，正确度高，准确度低；图 b 弹孔比较集中，但弹孔的分布中心距离靶心较远，表明随机误差小，系统误差大，即精密度高，正确度低，准确度低；图 c 弹孔集中，其分布中心距靶心最近，表明系统误差和随机误差均小，其精密度和正确度都高，即准确度高。

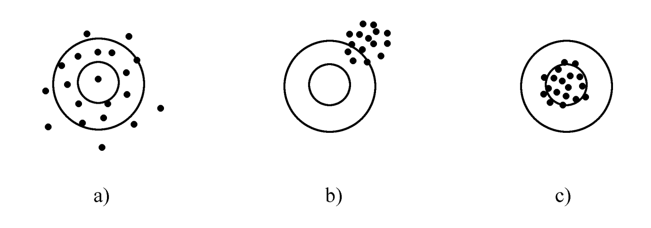


图 3-5　测量误差与测量精度

（3）粗大误差　粗大误差是指明显超出规定条件下预期的误差。粗大误差主要是由某些不正常的原因造成的。例如，测量者主观上的粗心大意、读数或记录错误等；测量仪器和被测件客观上的突然振动等。由于粗大误差一般数值比较大，它会显著地歪曲测量结果，因此是不允许存在的。在正常的测量过程中，应该而且能够判别出粗大误差并将其剔除。

3.5.4　测量精度的分类

在测量领域中，根据随机误差和系统误差的影响，把测量精度分为如下三类：

（1）精密度　它反映测量结果中随机误差的影响程度。若随机误差小，则精密度高。

（2）正确度　它反映测量结果中系统误差的影响程度。若系统误差小，则正确度高。

（3）准确度　测量结果与被测量真值之间的一致程度。它反映测量结果中系统误差和随机误差对测量结果的综合影响程度，只有精密度和正确度都高（系统误差和随机误差都小），准确度才高。

3.5.5　测量误差的数据处理

1. 随机误差的数据处理

（1）随机误差的分布规律和特性　根据大量的测试实验数据进行统计后发现，随机误差多数情况下服从正态分布规律（随机误差其他分布规律有均匀分布、三角分布、反正弦分布等）。正态分布曲线见图3-6a，由图可见，随机误差具有如下四个分布特性：

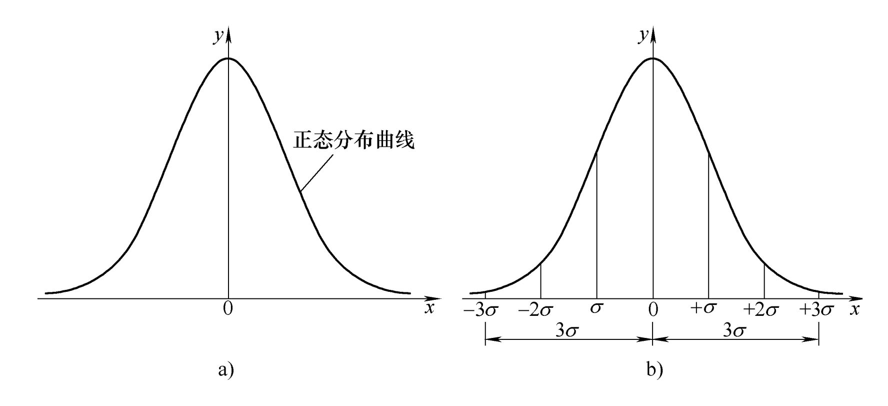


图3-6　正态分布曲线

1）单峰性。绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大。

2）对称性。绝对值相等的正、负误差出现的概率相等。

3）抵偿性。随着测量次数的增加，随机误差的算术平均值趋于零。

4）有界性。在一定的测量条件下，随机误差的绝对值不会超过一定界限。

（2）随机误差的处理与评定　随机误差从理论上讲是不可能消除的，但可用概率论和数理统计的方法，通过对一系列测得值的处理来减小其对测量结果的影响，并评定其影响程度。如果没有系统误差和粗大误差，则随机误差就等于测得值与真值之差，即

$$\delta = x - x_0$$

随机误差特性的正态分布曲线的数学表达式为

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \tag{3-4}$$

式中　y——概率分布密度；

σ——标准偏差；

e——自然对数的底，e = 2.71828；

δ——随机误差。

从式（3-4）可以看出，概率分布密度 y 的大小与随机误差 δ 和标准偏差 σ 有关。当 $\delta=0$ 时，概率密度 y 最大，即

$$y_{\max}=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$

显然概率密度最大值 $y_{\max}$ 是随标准偏差 σ 变化的。标准偏差 σ 越小，分布曲线就越陡，随机误差的分布就越集中，表示测量的精密度就越高。反之，标准偏差 σ 越大，分布曲线就越平坦，随机误差的分布就越分散，表示测量的精密度就越低。标准偏差 σ 是反映测量列中测得值分散程度的一项重要指标，是评定随机误差的尺度。

随机误差的标准偏差 σ 可用下式计算得到：

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\delta_i^2}{n}} \tag{3-5}$$

式中　n——测量次数。

随机误差具有有界性，因此随机误差的大小不会超过一定的范围，即随机误差存在极限误差。由概率论的知识可知，正态分布曲线和横坐标轴间所包含的面积等于所有随机误差出现的概率总和，若随机误差区间落在（$-\infty\sim+\infty$）之间，则其概率 p 为 1，即

$$p=\int_{-\infty}^{+\infty}y\mathrm{d}\delta=\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}}\mathrm{d}\delta=1$$

实际上随机误差区间落在（$-\delta\sim+\delta$）之间，其概率 <1，将上式改写为

$$p=\int_{-\delta}^{+\delta}y\mathrm{d}\delta=\int_{-\delta}^{+\delta}\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}}\mathrm{d}\delta$$

设 $t=\delta/\sigma$ 则 $\mathrm{d}t=\mathrm{d}\delta/\sigma$，代入上式可得

$$p=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-t}^{+t}\mathrm{e}^{-\frac{t^2}{2}}\mathrm{d}t \tag{3-6}$$

式中　t——置信系数。

表 3-4　四个特殊置信系数对应的概率

t	$\delta=t\sigma$	$\phi(t)$	不超出 δ 的概率 p	超出 δ 的概率 $p'=1-p$
1	σ	0.3413	0.6826	0.3174
2	2σ	0.4772	0.9544	0.0456
3	3σ	0.49865	0.9973	0.0027
4	4σ	0.499968	0.99936	0.00064

由式（3-6）求出积分值 p，列成表格的形式（概率函数积分值表），供大家查

用。表3-4列出了t分别等于1、2、3、4的几个特殊的积分值，并分别求出单次测量的随机误差δ不超出$\pm t\sigma$区间的置信概率p，以及超出$\pm t\sigma$区间的概率$1-p$。从表中所列数据可以看到：当置信系数$t=3$时，δ不超出$\pm 3\sigma$的概率为0.9973，超出$\pm 3\sigma$的概率为0.0027；当置信系数$t=4$时，δ不超出$\pm 4\sigma$的概率为0.99936，超出$\pm 4\sigma$的概率为0.00064。由于超出$\pm 3\sigma$的范围的概率已经很小，即随机误差超出3σ的情况实际很少出现，在生产实践中常认为$\pm 3\sigma$的概率$p\approx 1$，所以，取测量极限误差$\delta_{\lim}=3\sigma$（见图3-6b）。

如果将上述分析看成是一次测量实验的分析，并且获得了它的测量的标准偏差为σ，那么，用上述测量方法进行测量时，其测量的不确定度u就可以确定。若用上述测量方法获得的测量值为x，则其标准不确定度$u=\sigma$，其扩展不确定度等于标准不确定度乘以一个包含因子k_p（即上述的置信系数）来确定，即$u_p=k_p\sigma$，当k_p取2时，则$u_{95.44}=2\sigma$；当取为$k_p=3$时，则$u_{99.73}=3\sigma$。

由正态分布的第三个基本性质可知，当测量次数n增大时，算术平均值愈趋近于真值。因此，用算术平均值作为最后测量结果比用其他任一测量值作为测量结果更可靠。算术平均值按下式计算：

$$\bar{x}=\frac{1}{n}(x_1+x_2+x_3+\cdots+x_n)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i \tag{3-7}$$

由于随机误差δ难以得到（因真值x_0难以获得），实践中常用残余误差来计算标准偏差，即用贝塞尔公式（3-9）计算。残余误差的计算公式为

$$v_i=x_i-\bar{x} \tag{3-8}$$

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}v_i^2}{n-1}} \tag{3-9}$$

在生产实践中，测量次数不可能是无限多次，因此用贝塞尔公式算出的标准偏差，称为实验标准偏差，常用s表示，即

$$s=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}v_i^2}{n-1}} \tag{3-10}$$

算术平均值的标准偏差$s_{\bar{x}}$的计算为

$$s_{\bar{x}}=\frac{s}{\sqrt{n}} \tag{3-11}$$

显然，多次测量结果的精度比单次测量的精度高，即测量次数越多，测量的精密度就越高。但测量次数太多，也会影响测量效率和测量成本，且对提高测量精密度的效果变得不那么明显，一般取测量次数$n>10$（15次左右）即可。

若取算术平均值作为测量结果，则其测量极限误差$\delta_{\lim(\bar{x})}$为

$$\delta_{\lim(\bar{x})}=\pm 3s_{\bar{x}} \tag{3-12}$$

多次测量所得结果的应分别写明算术平均值和实验标准偏差的大小。

2. 系统误差的数据处理

在实际测量中，系统误差的数值往往比较大，因而不能忽视系统误差对测量结果的影响。找出系统误差出现的规律性，就可以采用适当的方法消除或减小系统误差对测量结果的影响，这是提高测量准确度的一个关键因素。

（1）发现系统误差的方法　发现系统误差的方法有多种，但目前还没有一种能够可以发现各种系统误差的方法，下面介绍两种发现系统误差常用的方法。

1）实验对比法。实验对比法适用于发现定值系统误差，该方法通过改变产生系统误差的测量条件，进行不同测量条件下的测量来发现系统误差。例如量块按标称尺寸使用时，在测量结果中，就存在着由于量块尺寸偏差而产生的大小和符号均不变的定值系统误差，重复测量也不能发现这一误差，只有用另一块更高等级的量块进行对比测量，才能发现它。

2）残余误差观察法。残余误差观察法是指根据测量列的各个残余误差列表或作图，观察残余误差数据的大小和符号的变化规律，或残余误差曲线图形的特征来判断有无系统误差。这种方法主要适用于发现大小和符号按一定规律变化的变值系统误差。

例如根据测量先后顺序，将测量列的残余误差作图（见图3-7），观察残余误差的规律。若残余误差大体上正、负相同，又没有显著变化，就认为不存在变值系统误差，如图3-7a所示；若残余误差按近似的线性规律递增或递减，就可判断存在着线性系统误差，如图3-7b所示；若残余误差的大小和符号有规律地周期变化，就可判断存在着周期性系统误差，如图3-7c所示。

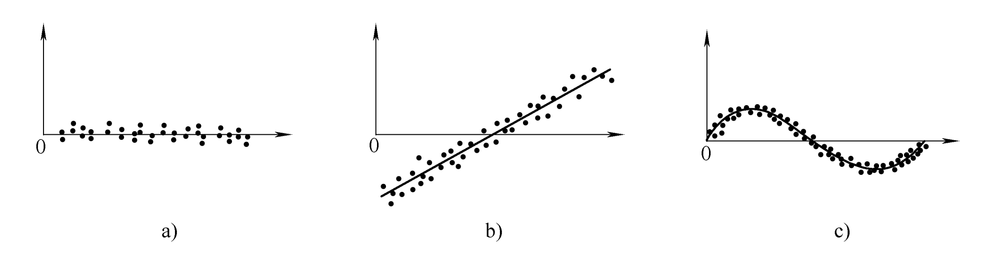


图3-7　变值系统误差的发现

（2）消除系统误差的方法　发现测量列存在系统误差以后，就要根据系统误差的规律，消除系统误差。若知道系统误差的大小和符号，则可采用修正的方法加以消除或减小。若知道系统误差存在，但不知道其大小和正负，这时可采用误差抵偿法或误差分离法来消除或减小它。下面分别介绍几种消除系统误差的方法。

1）从产生系统误差的根源消除。这是消除系统误差的最根本的方法。例如，为了防止测量过程中仪器示值零位的变动，测量开始和结束时都需检查示值零位；正确选择测量基准；保证被测零件和量具都处于标准温度条件下等。

2）用误差修正法消除系统误差。预先将计量器具的系统误差检定或计算出来，做出误差表或误差曲线，然后取与误差数值相同而符号相反的值作为修正值，将测得值加上相应的修正值，即可使测量结果不包含系统误差。如果知道测量结果中包含有系统误差，且误差的大小、正负均已知道，则可将测量结果减去已知系统误差值，从而获得不含（或少含）系统误差的测量结果（已修正结果）。当然，也可将已知系统误差取相反的符号，变成修正值，并用代数法将此修正值与未修正测量结果相加，而算出已修正的测量结果。

例如，用比较仪测量零件。测量开始时，比较仪的零位是用标准件（或量块）调整的，而测量零件的测量结果是由标准件尺寸加仪器的示值而得到。因此，标准件的误差就带入了测量结果。为了修正此系统误差，可用高等级的量块（作为约定真值）对标准件进行检定，获得标准件的误差。并将此误差反号作为修正值，加到零件的测量结果中，从而得到修正了系统误差的测量结果。

3）误差抵偿法消除系统误差。生产中，要得到系统误差的大小和正负号非常麻烦，有的情况下还无法得到，但通过分析发现，一个测量结果中包含的系统误差和另一个测量结果中包含的系统误差，大小相等，符号相反。此时，可用此两测量结果相加取平均，可抵消其系统误差。

例如，在工具显微镜上测量螺纹螺距时，为了消除螺纹轴线与量仪工作台移动方向倾斜而引起的系统误差，可分别测取螺纹左、右牙面的螺距，然后取它们的平均值作为螺距测得值。

4）误差分离法消除系统误差。误差分离法常用在形状误差（如直线度、平面度、圆度）测量中，有时也用于齿轮周期误差的测量，因为这些项目的测量往往需要有高准确度的基准，如基准轴系（测圆度、齿轮周期误差等）、基准平面、基准直线等。由于基准存在误差，所以测得的测量结果中也包含系统误差。对这类系统误差则可采用误差分离的方法，将其分离，使测量得到的测量结果中不包含系统误差。误差分离法就是采用反向测量、多步测量或多测头测量等方法，使之获得较多的测量信息（结果），然后通过某一种计算方法将其分离，从而获得准确的测量结果。

消除和减小系统误差的关键是找出误差产生的根源和规律。实际上，系统误差不可能完全消除。一般来说，系统误差若能减小到使其影响相当于随机误差的程度，则可认为已被消除。

3. 粗大误差的处理

粗大误差的数值相当大，在测量中应尽可能避免。如果粗大误差已经产生，则应根据判断粗大误差的准则予以剔除。发现和剔除粗大误差的方法，通常是用重复测量或改用另一种测量方法加以核对。对于等精度多次测量值，通常用拉依达准则来判断。

拉依达准则又称 3σ 准则。当测量列服从正态分布时，残余误差落在 $\pm 3\sigma$ 外

的概率很小，仅有0.27%，即在连续370次测量中只有1次测量的残余误差会超出$\pm 3\sigma$。因此，当出现绝对值大于3σ的残余误差时，即$|v_i| > 3\sigma$，则认为该残余误差对应的测得值含有粗大误差，应予以剔除。

3.6 函数误差

在某些情况下，由于被测对象的特点，不能进行直接测量，这时就需要采用间接测量。例如，通过测量大尺寸圆柱形零件的圆周长进行直径测量；通过测量液柱高度进行压力测量；利用电阻温度计进行温度测量等。

间接测量是通过测量与被测量有函数关系的其他量，来得到被测量值的测量方法。在进行间接测量时，需要先测量与被测量有函数关系的其他量（实测几何量）。每个实测几何量均存在测量误差，因此，由函数关系计算得到的被测量的误差是实测几何量误差的函数，故称这种误差为函数误差。

在间接测量中，被测几何量通常是n个实测几何量的多元函数，其多元函数的一般表达式为

$$y = F(x_1, x_2, \cdots, x_n) \tag{3-13}$$

式中 y——被测量；

x_i——实测量。

函数全微分表达式为

$$\mathrm{d}y = \frac{\partial F}{\partial x_1}\mathrm{d}x_1 + \frac{\partial F}{\partial x_2}\mathrm{d}x_2 + \cdots + \frac{\partial F}{\partial x_n}\mathrm{d}x_n \tag{3-14}$$

式中 $\mathrm{d}y$——被测量的测量误差；

$\mathrm{d}x_i$——实测量的测量误差；

$\frac{\partial F}{\partial x_i}$——实测量的测量误差传递系数。

各个实测量的测量结果存在系统误差，则被测量也存在系统误差，被测量系统误差计算表达式为

$$\Delta y = \frac{\partial F}{\partial x_1}\Delta x_1 + \frac{\partial F}{\partial x_2}\Delta x_2 + \cdots + \frac{\partial F}{\partial x_n}\Delta x_n \tag{3-15}$$

式中 Δy——被测量的系统误差；

Δx_i——实测量的系统误差。

各个实测量的测量结果存在随机误差，则被测量也存在随机误差。由误差理论可知，函数的标准偏差，等于该函数对各变量在给定点上的偏导数（误差传递系数）与其相应测得值标准偏差乘积之和的平方根，即

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^2\sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)^2\sigma_{x_2}^2 + \cdots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_n}\right)^2\sigma_{x_n}^2} \tag{3-16}$$

函数的实验标准偏差一般可表示如下：

$$s_y = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^2 s_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)^2 s_{x_2}^2 + \cdots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_n}\right)^2 s_{x_n}^2} \qquad (3\text{-}17)$$

3.7 重复条件下测量列的数据处理

在重复条件下，对某一几何量进行 n 次重复测量，得到测量列 x_1，x_2，…，x_n。所谓的重复条件一般指测量时，在测量器具、测量人员、测量方法及测量的环境条件不变的情况下，对某一几何量进行的连续多次测量。

在这些测量列中，可能既包含系统误差，又包含随机误差。为了获得可靠的测量结果，应将测量列数据按以上误差分析的方法进行处理（修正）。现在通过一例子说明重复条件下测量列的数据处理步骤。

【例3-1】对某加工工件的同一部位进行10次重复测量，测量列数据见表3-5，试求测量结果。

表3-5 重复条件下测量列的数据处理

序号	x_i	$v_i = x_i - \bar{x}$	v_i^2
1	20.048	0.000	0.000
2	20.047	−0.001	0.000001
3	20.049	+0.001	0.000001
4	20.046	−0.002	0.000004
5	20.050	+0.002	0.000004
6	20.051	+0.003	0.000009
7	20.043	−0.005	0.000025
8	20.052	+0.004	0.000016
9	20.049	+0.001	0.000001
10	20.045	−0.003	0.000009
	$\sum_{i=1}^{10} x_i = 200.48$ $\bar{x} = \frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10} x_i = 20.048$	$\sum_{i=1}^{10} v_i = 0$	$\sum_{i=1}^{10} v_i^2 = 0.000\,07$

解：① 检查测量列中有无系统误差的存在。如为已定系统误差或能掌握确定规律的系统误差（线性系统误差、周期性变化的系统误差），应查明原因，在测量前加以减小和消除，或者在测量值中加以修正。

② 求测量列的算术平均值：

$$\bar{x} = \frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10} x_i = 20.048$$

③ 求残余误差：

$$v_i = x_i - \bar{x} \qquad (i = 1、2、3、\cdots、10)$$

④ 求实验标准偏差：

$$s=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10}v_i^2}{n-1}}=\sqrt{\frac{0.00007}{9}}=0.0028$$

⑤ 判断粗大误差，若存在粗大误差，则应将其剔除后重新计算新测量列的算术平均值、残余误差和标准偏差。应为$|v_i|<3s=0.0084$，故本次测量不存在粗大误差。

⑥ 求测量列算术平均值的实验标准偏差值：

$$s_{\bar{x}}=\frac{s}{\sqrt{n}}=\frac{0.0028}{\sqrt{10}}=0.00088$$

⑦ 写出测量结果。该工件的测量结果为20.048，实验标准偏差为0.00088。

自测习题三

1. 测量的实质是什么？一个完整的测量过程包括哪几个要素？

2. 试用83块一套的量块组合出尺寸32.925mm和16.355mm。

3. 什么是测量误差？测量误差有几种表示形式？

4. 测量误差按性质可分为哪几类？随机误差的分布规律和特征是什么？

5. 某计量器具在示值50mm处的示值误差为+0.004mm，若用该计量器具测量工件时，读数正好是50mm。试确定该工件的实际尺寸是多少。

6. 测量尺寸为100mm的零件，其测量的绝对误差8μm；测量尺寸为60mm的零件，其测量的绝对误差4μm。试判断哪个零件的测量精度高。

7. 已知某测量仪器的标准偏差为0.002mm，用此计量仪器对某零件进行8次重复测量，测量值分别为32.020、32.016、32.019、32.021、32.018、32.023、32.022、32.017。试求测量结果。

8. 在相同条件下，用立式光学计重复测量塞规的同一部位直径12次。按测量顺序记录测量值为36.042、36.043、36.040、36.041、36.042、36.043、36.040、36.042、36.043、36.042、36.041、36.043。试求出单次测量的实验标准偏差s，并写出测量结果。

9. 如图3-8所示，已知圆弧直径D与圆弧弦长L、弓高h的函数关系为：$D=L^2/(4h)+h$。现用万能工具显微镜测量图中圆弧的半径R。若测得的弦长L为54.800mm，其测量的实验标准偏差s_L为0.003mm，弓高h为16.500mm，其测量的实验标准偏差s_h为0.002mm。试确定圆弧的半径R及其测量的实验标准偏差。

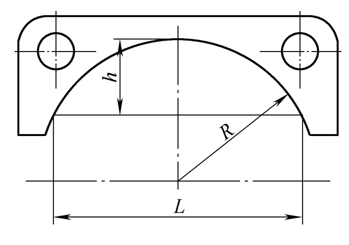


图3-8

第4章　几何公差与检测

4.1　几何公差概述

零件在加工过程中，由于机床夹具、刀具及工件所构成的工艺系统本身存在几何误差等因素的影响，零件表面、轴线、中心对称平面等的实际形状和位置相对于所要求的理想形状和位置，不可避免地会出现误差，称为几何误差。几何误差不仅影响零件的质量，还对零件的使用功能有很大影响。例如，在光滑工件的间隙配合中，形状误差使间隙分布不均匀，加速局部磨损，导致零件的工作寿命缩短；在过盈配合中则造成各处过盈量不一致而影响连接强度。因此，为满足零件的功能要求，保证互换性，必须对零件的几何误差进行限制，即规定必要的形状和位置公差。几何公差即形状和位置公差，简称形位公差。

现行几何公差国家标准主要有：

GB/T 1182—2008《产品几何技术规范（GPS）　几何公差形状、方向、位置和跳动公差标注》；

GB/T 1184—1996《形状和位置公差　未注公差值》；

GB/T 4249—2009《产品几何技术规范（GPS）　公差原则》；

GB/T 16671—2009《产品几何技术规范（GPS）　几何公差　最大实体要求、最小实体要求和可逆要求》。

4.1.1　几何公差的研究对象

几何公差的研究对象是零件的几何要素（简称为“要素”），就是构成零件几何特征的点、线、面，如图4-1所示零件的球心、锥顶、圆柱面和圆锥面的素线、轴线、球面、圆柱面和圆锥面、槽的中心平面等。

几何要素可从不同的角度分类：

1. 按结构特征分为组成要素和导出要素

（1）组成要素　指零件的表面或表面上的线，如图4-1所示零件的球面、圆柱面、圆锥面及素线。

（2）导出要素　指由一个或几个组成要素得到的中心点、中心线或中心面，如图4-1所示零件的球心、轴线、槽的中心平面等。

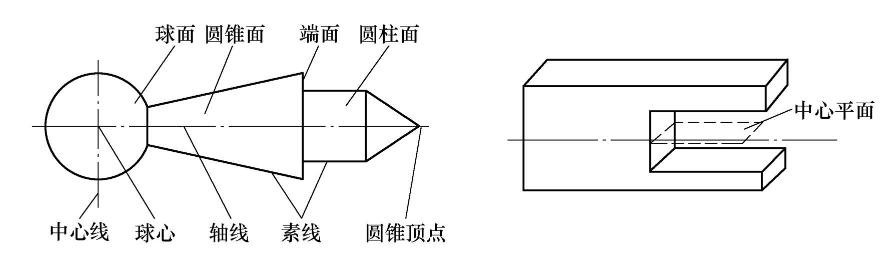


图 4-1　零件的几何要素

2. 按检测关系分为被测要素和基准要素

（1）被测要素　指图样上给出了几何公差要求的要素，也就是需要研究和测量的要素。

被测要素按照其功能要求分为单一要素和关联要素。

1）单一要素指对要素本身提出形状公差要求的被测要素。如图 4-2 所示，该零件的下表面有平面度要求。

2）关联要素指相对基准要素有方向或位置功能要求而给出方向公差和位置公差要求的被测要素。例如，图 4-2 中的 $2\times\phi20H7$ 的孔相对组合基准 $A—B$ 轴线有同轴度的要求。

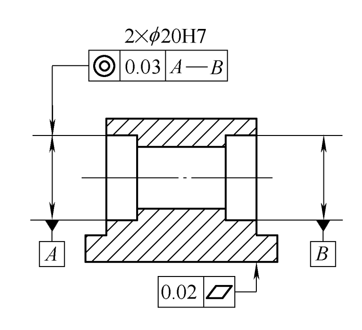


图 4-2　要素实例

（2）基准要素　指图样上规定用来确定被测要素的方向或位置的要素。基准要素按照本身功能要求可以是单一要素或关联要素，如图 4-2 中，$2\times\phi20H7$ 孔的轴线。

3. 按存在的状态分为理想要素和提取要素

（1）理想要素　指具有几何意义的要素，它们不存在任何误差。机械零件图上表示的要素均为理想要素（公称要素）。

（2）提取要素　指零件上实际存在的要素。通常都以测得（提取）要素来代替。

4.1.2　几何公差的特征及符号

国家标准 GB/T 1182—2008《产品几何技术规范（GPS）　几何公差形状、方向、位置和跳动公差标注》规定的几何公差的特征项目分为形状公差、位置公差、方向公差、跳动公差四大类，共计 19 个。几何公差的特征及符号见表 4-1、几何公差的特征附加符号见表 4-2。

表 4-1　几何公差的特征及符号

公差类型	几何特征	符　　号	有无基准
形状公差	直线度	⏤	无
	平面度	⏥	
	圆度	○	
	圆柱度	⌭	
	线轮廓度	⌒	
	面轮廓度	⌓	
方向公差	平行度	∥	有
	垂直度	⊥	
	倾斜度	∠	
	线轮廓度	⌒	
	面轮廓度	⌓	

公差类型	几何特征	符　　号	有无基准
位置公差	位置度	⌖	有或无
	同心度（用于中心点）	◎	有
	同轴度（用于轴线）	◎	
	对称度	⌯	
	线轮廓度	⌒	
	面轮廓度	⌓	
跳动公差	圆跳动	↗	有
	全跳动	⌰	

表 4-2　几何公差的特征附加符号

符号含义说明	符　　号	符号含义说明	符　　号
被测要素		可逆要求	Ⓡ
		自由状态条件（非刚性零件）	Ⓕ
基准要素	A　A	全周（轮廓）	
基准目标	ϕ2/A1	包容要求	Ⓔ
		公共公差带	CZ
理论正确尺寸	50	小径	LD
		大径	MD
延伸公差带	Ⓟ	中径、节径	PD
		线素	LE
最大实体要求	Ⓜ	不凸起	NC
最小实体要求	Ⓛ	任意横截面	ACS

4.1.3 几何公差带的特征

几何公差带是指由一个或几个理想的几何线或面所限定的、由线性公差值表示其大小的区域，它是限制实际被测要素变动的区域。该区域的形状、大小、方向和位置取决于被测要素和设计要求，并以此评定几何误差。只要实际被测要素全部位于该区域内，则认定该实际被测要素合格。

公差带形状由被测要素的几何形状、几何公差特征项目和标注形式决定，几何公差带的9种主要形状见表4-3。其中公差带的大小由公差带的宽度或直径表示，即给定的公差。

表4-3 几何公差带主要形状

形状	说明	形状	说明
t	两平行直线之间的区域	ϕt	一个圆柱内的区域
t	两等距线之间的区域	t	两同轴线圆柱面之间的区域
t	两同心圆之间的区域	t	两平行平面之间的区域
ϕt	一个圆内的区域	t	两等距面之间的区域
$S\phi t$	一个圆球面内的区域		

1. 公差带的大小

几何公差带的大小用公差值表示，公差值和公差带是多种多样的，公差带形状可分为用公差值 t 表示宽度的两条平行直线、两等距曲线、两同心圆、两同轴圆柱、两平行平面、两等距曲面，用公差值 ϕt 表示直径的一个圆、一个圆柱，以及用 $S\phi t$ 表示直径的一个球。

2. 公差带的方向

几何公差带的方向为公差带的宽度方向或垂直于被测要素的方向，通常为指引线箭头所指的方向。

3. 公差带的位置

公差带的位置分浮动和固定两种。

（1）浮动位置公差带　所谓的浮动位置公差带是指零件的实际尺寸在一定的公差所允许的范围内变动，因此有的要素位置就必然随着变动，这时其几何公差

带的位置也会随着零件实际尺寸的变动而变动。

（2）固定位置公差带　所谓的固定位置公差带是指几何公差带的位置给定之后，它与零件上的实际尺寸无关，不随尺寸大小变化而发生位置的变动。

4.2　几何公差的标注

4.2.1　几何公差代号

1. 公差框格

几何公差在图样上用框格的形式标注。形状公差框格由两格组成，位置公差框格由三格或多格组成，在图样上只能水平或垂直绘制。公差框格内容从左到右（或从下到上）依次为：带箭头的指引线、几何公差特征项目符号、公差值、基准符号（形状公差无基准）。其中，①指引线用细实线绘制，箭头应指向零件被测要素的公差带的宽度或者直径方向；②第一格填写几何特征符号；③第二格填写公差值，用线性值（单位为 mm）：如公差带是圆形或圆柱形，则在公差值前加注“ϕ”，如公差带是球形则加注“$S\phi$”，如图 4-3c、d 所示；④第三个格填写基准符号，代表基准的字母采用大写拉丁字母，为了不引起混淆，规定不得采用 *E*、*F*、*I*、*J*、*L*、*M*、*O*、*P* 和 *R* 等字母，可用一个字母表示单一基准或用几个字母表示多基准或公共基准，多基准的时候，字母的顺序代表其主次关系，如图 4-3 所示。

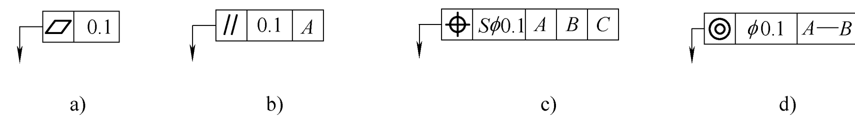


图 4-3　几何公差框格

2. 基准代号

基准要素符号是由在基准方框内的大写字母用细实线与一个涂黑（或空白）的三角形相连而组成，如图 4-4 所示。基准字母标注在相应被测要素的公差框格中，并且在基准方框内保持水平书写。基准有三类表达：①单一基准，用一个字母表示，如图 4-3b 所示；②基准体系，用多个字母表示，如图 4-3c 所示；③公共基准，有两个字母中间由短横线连接表示，如图 4-3d 所示。

4.2.2　被测要素的标注方法

用带箭头的指引线将被测要素与公差框格相连。指引线引自公差框格的任意一侧，指引线的箭头应与公差带的宽度方向一致。

1. 被测要素为组成要素的标注

1）当被测要素为零件的轮廓线或表面时，将指引线的箭头指向该要素的轮廓

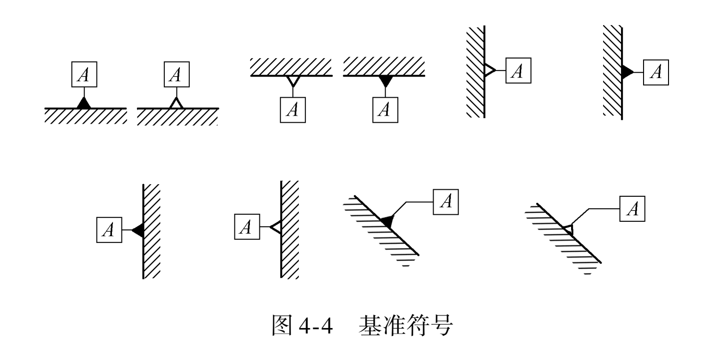


图 4-4　基准符号

线或其延长线上（但必须与尺寸线明显地错开至少 4mm），如图 4-5a、b 所示。

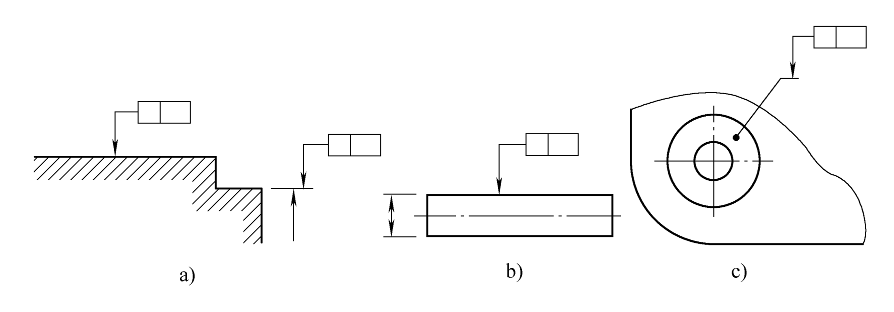


图 4-5　组成要素的标注

2）当被测要素为零件的表面时，指向被测要素的指引线箭头，也可以直接指在引出线的水平线上。引出线可由被测量面中引出，其引出线的端部应画一圆黑点，如图 4-5c 所示。

2. 被测要素为导出要素的标注

当被测要素为零件上某一段形体的轴线、中心平面或中心点时，指引线的箭头应与该尺寸线的箭头对齐或重合，如图 4-6 所示。

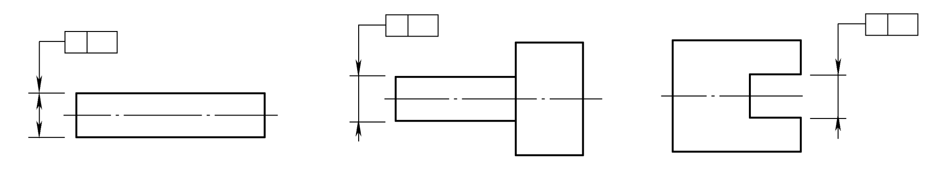


图 4-6　导出要素的标注

3. 特殊标注

1）当被测要素为要素的局部时，可用粗点画线限定其范围，并加注尺寸，如图 4-7 所示。

2）当几个被测要素具有相同的几何公差要求时，可共用一个公差框格，从框格一端引出多个指引线的箭头指向被测要素，如图 4-8 所示。当这几个被测要素位

于同一高度，且具有单一公差带时，可以在公差框格内公差值的后面加注公共公差带的符号 CZ，如图 4-8 所示。

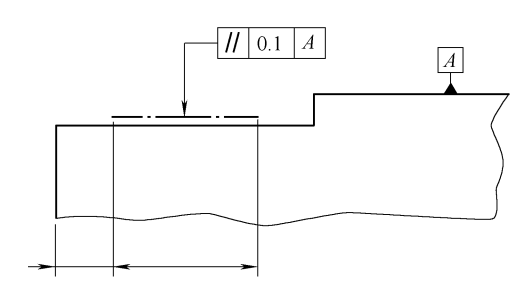


图 4-7 局部要素的标注

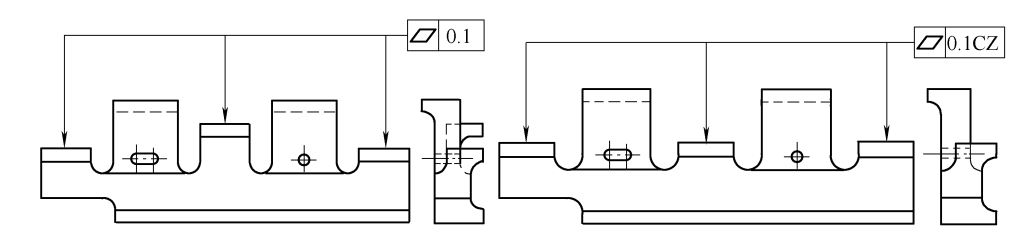


图 4-8 多要素同一项目要求的标注

3）用全周符号（在指引线的弯折处所画出的小圆）表示该视图的轮廓周边或周面均受此框格内公差带的控制，如图 4-9 所示。

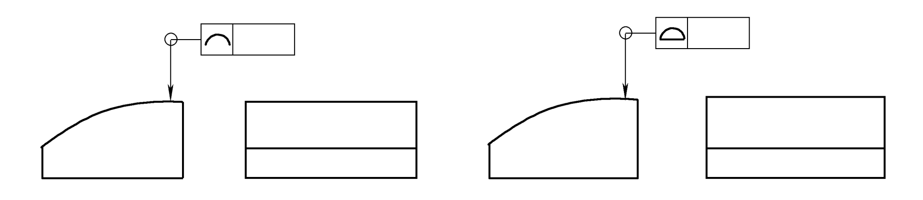


图 4-9 全周符号的应用

4）以螺纹轴线为被测要素时，默认为螺纹中径的轴线，否则应加以说明，例如大径用 MD，小径用 LD，如图 4-10 所示。

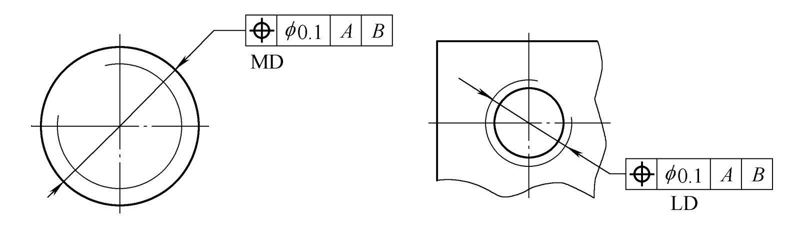


图 4-10 螺纹的几何公差标注

5）当被测要素为圆锥体轴线时，指引线箭头应与圆锥体的直径尺寸线（大端或小端）对齐，如图 4-11a 所示。如果直径尺寸线不能明显地区别圆锥体或圆柱体，则应在圆锥体里画出空白尺寸线，并将指引线的箭头与空白尺寸线对齐，如图 4-11b 所示。如果锥体是使用角度尺寸标注，则指引线的箭头应对着角度尺寸线，如图 4-11c 所示。

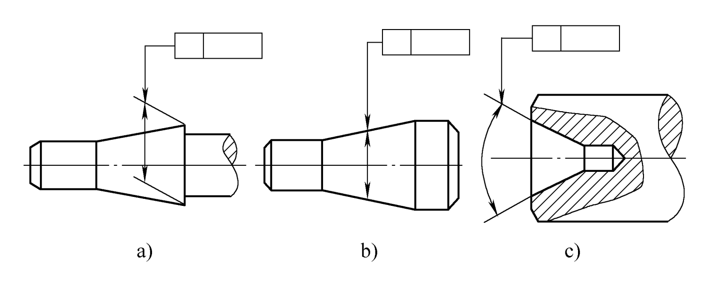


图 4-11　圆锥体的几何公差标注
a）、b）锥体轴线　c）锥孔轴线

6）当同一被测要素有多项几何公差要求时，若公差带变化方向相同（指引线箭头方向一致），可以将这些框格合并，只用一条指引线引出，如图 4-12所示。

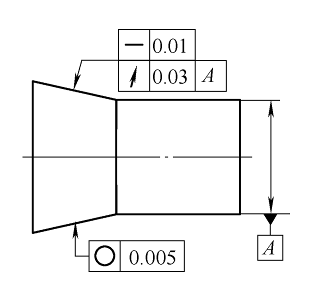


图 4-12　同一被测要素多项几何公差的标注

7）附加标注。

① 若几何公差值是指被测要素的任意长度或范围，应在公差框格的公差值后面填写相应的数值。如图 4-13a 所示，该几何公差标注表示被测要素在任意 200mm 长度内，直线度公差为 0.02mm；如图 4-13b所示，该几何公差标注表示被测要素在全长的直线度公差为 0.05mm，而在任意 200mm 长度内，直线度公差为 0.02mm；如图 4-13c 所示，该几何公差标注表示被测要素在任意 100mm × 100mm 正方形面积上，平面度公差为 0.05mm。

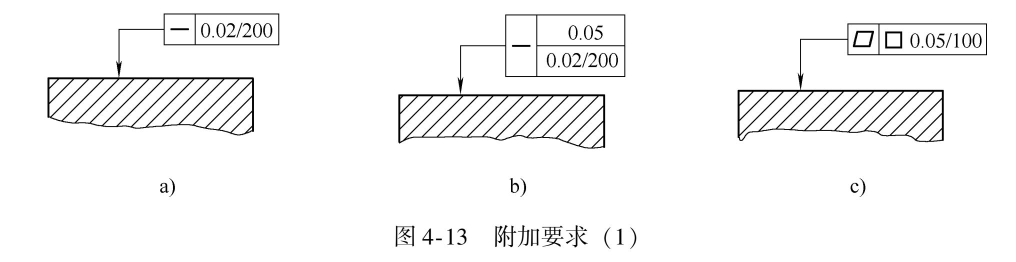


图 4-13　附加要求（1）

② 附加符号的标注。在公差框格的公差值后面加注相关符号，表达对几何公差的附加要求，如图 4-14 所示。附加符号的含义见表 4-2 和表 4-4。

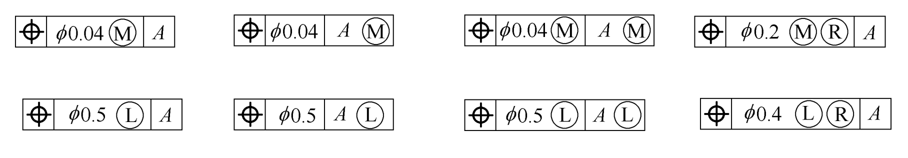


图 4-14 附加要求（2）

表 4-4 附加要求

附加符号标注	符 号 说 明
▱ 0.02 (+)	被测要素只允许中间向材料外凸起
— 0.02 (−)	被测要素只允许中间向材料内凹下
⌭ 0.03 (▷)	被测要素只允许从左至右减小
⌭ 0.03 (◁)	被测要素只允许从右至左减小

③ 简化表达。为了简化标注方法，通常在框格的下方或上方附加文字说明。若对被测要素的数量进行文字说明，写在公差框格上方，如图 4-15 所示；解释性质的文字说明，写在公差框格下方，如图 4-16 所示。

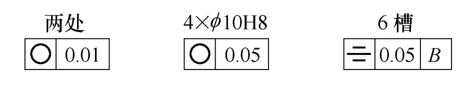


图 4-15 简化表达（1）

⊥ φ0.05 A	// 0.05 C	— 0.05	⌒ 0.05	↗ 0.05 D	○ 0.01
分别要求	排除形状误差	长向	在 *ab* 范围内	在离轴端 300 处	3–3

图 4-16 简化表达（2）

4.2.3 基准要素的标注

1. 基准要素为组成要素的标注

1）当基准要素为零件的轮廓线或表面时，将指引线的箭头指向该要素的轮廓线或其延长线上（但必须与尺寸线明显地错开至少 4mm），如图 4-17a 所示。

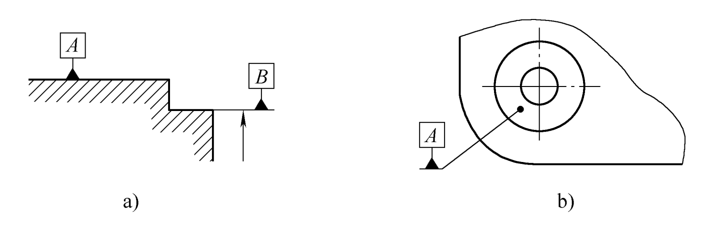


图 4-17 组成要素的标注

2）当基准要素为零件的表面时，基准符号中的三角形也可放置在该轮廓面引出线的水平线上，其引出线的端部应画一圆黑点，如图 4-17b 所示。

2. 基准要素为导出要素的标注

当基准要素为零件上某一段形体的轴线、中心平面或中心点时，则基准符号中的三角形应与该尺寸线的箭头对齐或重合，如图 4-18 所示。

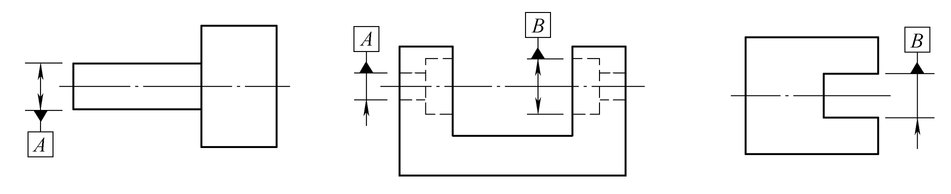


图 4-18　导出要素的标注

3. 以要素的某一局部作基准

以要素的某一局部为基准，则应用粗点画线示出该部分并加注尺寸，如图 4-19 所示。

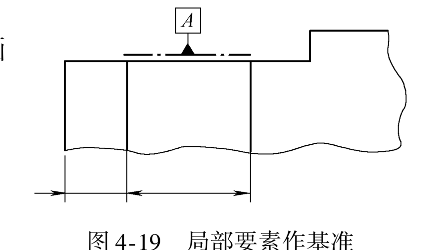


图 4-19　局部要素作基准

4.3　几何公差及检测

4.3.1　形状公差

1. 形状公差与公差带

形状公差是指单一实际要素的形状所允许的变动全量。形状公差带定义、标注示例和解释见表 4-5。

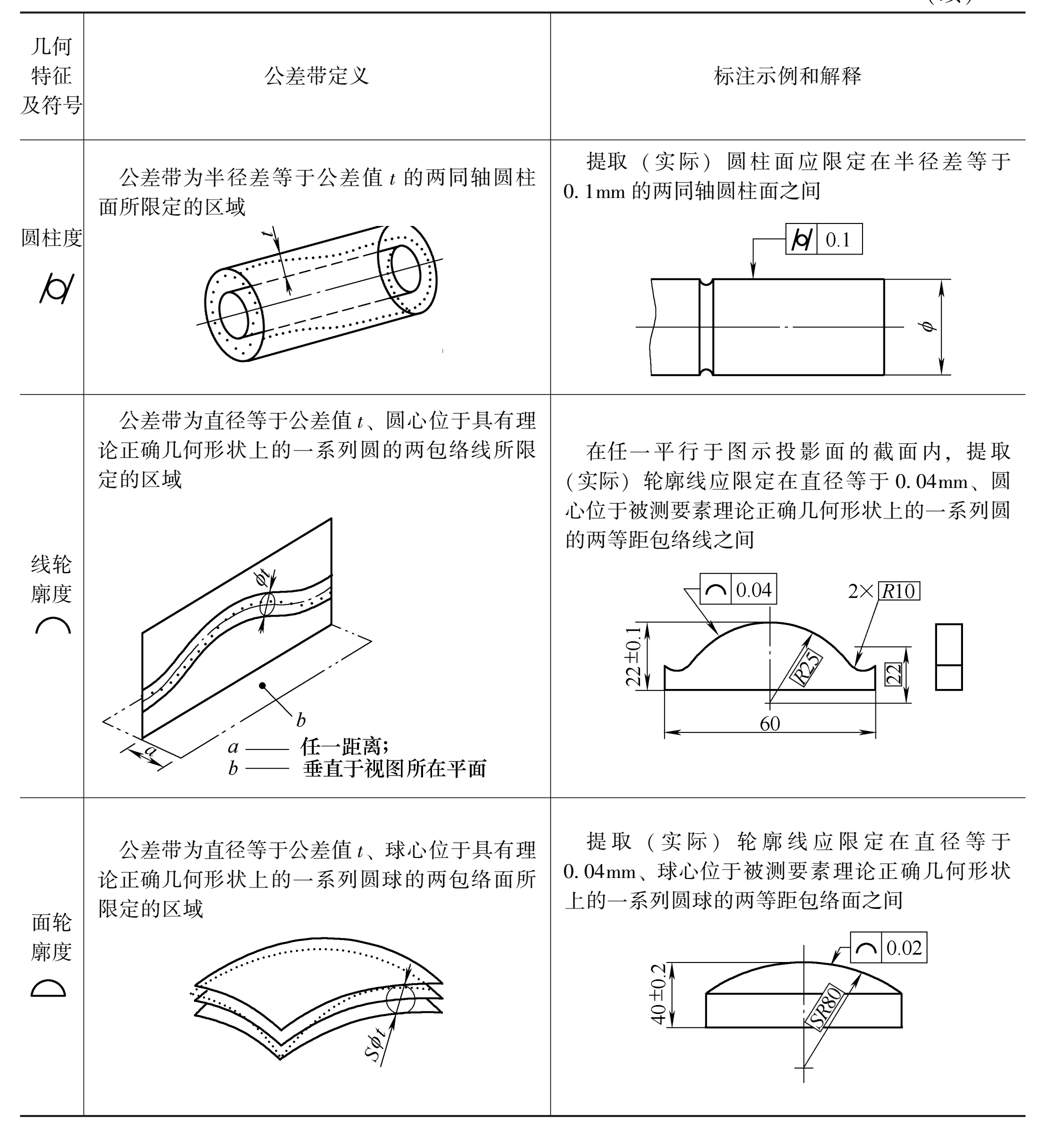
表 4-5　形状公差带定义、标注示例和解释

几何特征及符号	公差带定义	标注示例和解释
直线度 —	公差带为给定平面内和给定方向上，间距等于公差值 t 的两平行直线所限定的区域 t a a——任一距离	在任一平行于图示投影面的平面内，被测上平面的提取（实际）线应限定在间距等于 0.1mm 的两平行直线之间 — 0.1

（续）

几何特征及符号	公差带定义	标注示例和解释
直线度 —	公差带为间距等于公差值 t 的两平行平面所限定的区域	被测提取（实际）的棱边应限定在间距等于 0.1mm 的两平行平面之间 — 0.1
	公差带为直径等于公差值 ϕt 的圆柱面所限定的区域 注意：公差值前加注符号 ϕ	外圆柱面的提取（实际）中心线应限定在直径等于 ϕ0.08mm 的圆柱面内 — ϕ0.08
平面度 ▱	公差带为间距等于公差值 t 的两平行平面所限定的区域	提取（实际）表面应限定在间距等于 0.08mm 的两平行平面之间 ▱ 0.08
圆度 ○	公差带为在给定横截面内、半径差等于公差值 t 的两同心圆所限定的区域 a——任一横截面	在圆柱（或圆锥）面的任意横截面内，提取（实际）圆周应限定在半径差等于 0.03mm 的两同心圆之间 ○ 0.03 在圆锥面的任意横截面内，提取（实际）圆周应限定在半径差等于 0.1mm 的两同心圆之间 ○ 0.1

（续）



几何特征及符号	公差带定义	标注示例和解释
圆柱度 ⌭	公差带为半径差等于公差值 t 的两同轴圆柱面所限定的区域	提取（实际）圆柱面应限定在半径差等于 0.1mm 的两同轴圆柱面之间
线轮廓度 ⌒	公差带为直径等于公差值 t、圆心位于具有理论正确几何形状上的一系列圆的两包络线所限定的区域	在任一平行于图示投影面的截面内，提取（实际）轮廓线应限定在直径等于 0.04mm、圆心位于被测要素理论正确几何形状上的一系列圆的两等距包络线之间
面轮廓度 ⌓	公差带为直径等于公差值 t、球心位于具有理论正确几何形状上的一系列圆球的两包络面所限定的区域	提取（实际）轮廓线应限定在直径等于 0.04mm、球心位于被测要素理论正确几何形状上的一系列圆球的两等距包络面之间

2. 形状误差及其评定

形状误差是被测实际要素的形状对其理想要素的变动量。当被测实际要素与理想要素进行比较时，由于理想要素所处的位置不同，得到的最大变动量也会不同。为了正确和统一地评定形状误差，就必须明确理想要素的位置，国家标准规定：形状误差的评定准则是最小条件。

（1）形状误差的评定准则——最小条件　最小条件是指被测提取要素对其拟合要素的最大变动量为最小。如图 4-20 所示，拟合直线Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ处于不同的位置，被测提取要素相对于拟合要素的最大变动量分别为 f_1、f_2、f_3，且 $f_1 < f_2 < f_3$，

所以拟合直线Ⅰ的位置符合最小条件。

（2）形状误差的评定方法——最小区域法　最小区域是指包容被测要素时，具有最小宽度或者直径的包容区域，其形状与公差带形状相同。用拟合要素的位置符合最小条件的最小包容区域的宽度或直径来表示几何误差值。

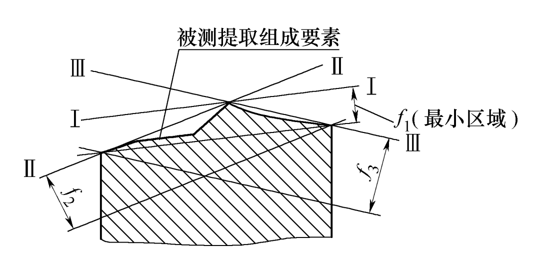


图 4-20　最小条件和最小区域

最小区域可根据被测实际要素与包容它的理想要素的接触状态来判别。

1）直线度误差的评定。在给定平面内，由两条平行直线包容实际被测轮廓线时，实际轮廓线应至少有两峰夹一谷（或两谷夹一峰）三点与两包容直线接触（见图 4-21），这个包容区就是最小区域，其宽度即直线度误差。

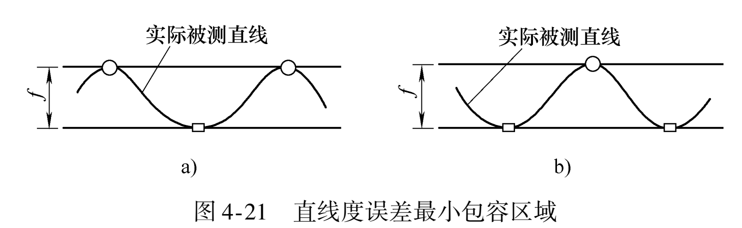


图 4-21　直线度误差最小包容区域

a）两峰夹一谷　b）两谷夹一峰

2）平面度误差的评定。评定平面度误差用最小区域法。最小区域法的包容区域为两平行平面间的区域，被测平面轮廓至少有三点或四点分别与此两平行平面接触，且满足下列条件之一（见图 4-22，即包容区域为最小区域），此时两平行平面间的距离即平面度误差值。

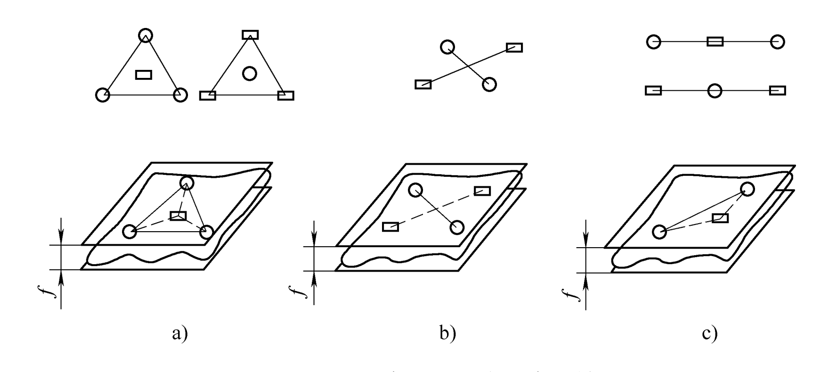


图 4-22　平面度误差最小包容区域

① 三角形接触。至少有三点与一平面接触，有一点与另一平面接触，且该点的投影能落在由上述三点连成的三角形区域内，如图 4-22a 所示。

② 交叉接触。至少各有两点分别与两平行平面接触，且与同一平面接触的两

点连成的直线与另一平面接触的两点连成的直线在空间呈交叉状态，如图 4-22b 所示。

③ 直线接触。有两个最高（低）点和一个最低（高）点分别与两理想平面接触，且最低（高）点在另一平面上的投影位于两个最高（低）点的连线上，如图 4-22c所示。

3）圆度误差的评定。圆度误差的评定方法是最小区域圆心法。同心圆包容实际被测轮廓，实际圆轮廓至少有内外交替四点与两包容圆接触，这个包容区就是最小区域，两同心圆的半径差值即为圆度误差值，如图 4-23 所示。

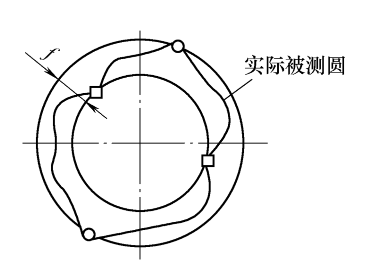


图 4-23　圆度误差最小包容区域

4）圆柱度误差的评定。圆柱度误差的评定方法与圆度误差评定方法类似，所不同的是检测圆柱度误差时，在被测圆柱面上测量若干个正截面得到一组数据，按最小条件求出圆柱度误差值。在生产实际中，有时采用近似法来测量圆柱度误差，即用两点法和三远点法检测圆柱度误差（略）。

4.3.2　方向公差与公差带

方向公差是指关联实际要素对基准在方向上允许的变动全量。方向公差带的方向是固定的，由基准来确定，而其位置则可在尺寸公差带内浮动，包括平行度、垂直度、倾斜度、线轮廓度和面轮廓度。方向公差带定义、标注示例和解释见表 4-6。

表 4-6　方向公差带定义、标注示例和解释

几何特征及符号	公差带定义		标注和解释
平行度 //	线对基准体系的平行度公差	公差带为间距等于公差值 t、平行于两基准（基准轴线和平面）的两平行平面所限定的区域 t a b a—— 基准轴线 b—— 基准平面	提取（实际）中心线应限定在间距等于 0.1mm、平行于基准轴线 A 和 B 的两平行平面之间 // 0.1 A B B A

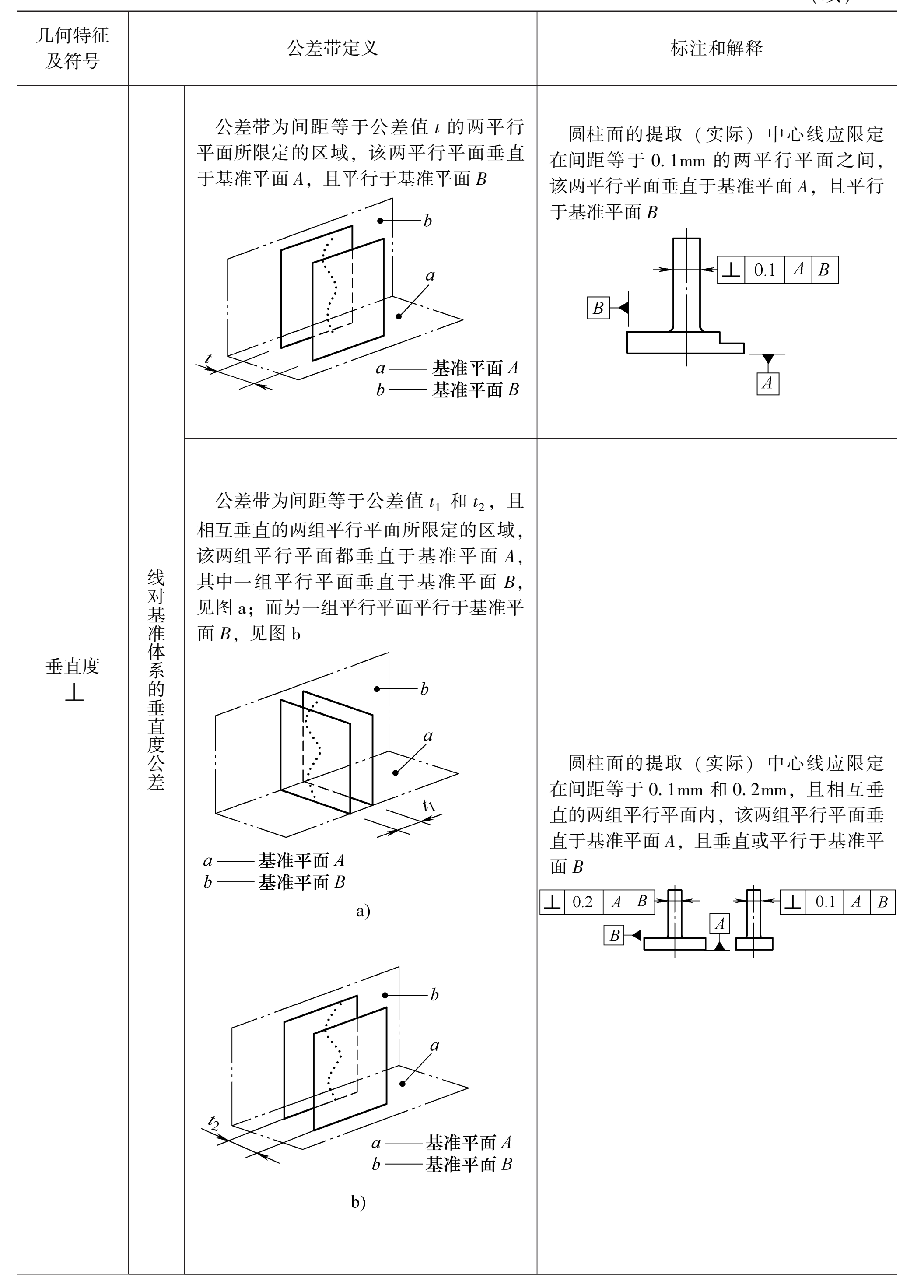
（续）

几何特征及符号		公差带定义	标注和解释
平行度 //	线对基准体系的平行度公差	公差带为间距等于公差值 t、平行于基准轴线 A 且垂直于基准平面 B 的两平行平面所限定的区域 t a b a——基准轴线 b——基准平面	提取（实际）中心线应限定在间距等于0.1mm的两平行平面之间，该两平行平面平行于基准轴线 A 且垂直于基准平面 B // 0.1 A B A B
		公差带为平行于基准轴线和平行或垂直于基准平面、距离分别为公差值 t_1 和 t_2，且相互垂直的两平行平面所限定的区域 t_2 t_1 b a a——基准轴线 b——基准平面	提取（实际）中心线应限定在平行于基准轴线 A 和平行或垂直于基准平面 B、间距分别等于0.1mm和0.2mm，且相互垂直的两平行平面之间 // 0.2 A B // 0.1 A B B A
		公差带为间距等于公差值 t 的两平行直线所限定的区域，该两平行直线平行于基准平面 A 且处于平行于基准平面 B 的平面内 b t t a a——基准平面 A b——基准平面 B	提取（实际）线应限定在间距等于0.02mm的两平行直线之间，该两平行直线平行于基准平面 A 且处于平行于基准平面 B 的平面内 // 0.02 A B LE B A

（续）

几何特征及符号		公差带定义	标注和解释
平行度 //	线对线的平行度公差	公差带为平行于基准轴线、直径等于公差值 ϕt 的圆柱面所限定的区域 注意：公差值前加注符号 ϕ a —— 基准轴线	提取（实际）中心线应限定在平行于基准轴线 A、直径等于 $\phi 0.03\text{mm}$ 的圆柱面内
	线对基准面的平行度公差	公差带是平行于基准平面、距离为公差值 t 的两平行平面所限定的区域 a —— 基准平面	提取（实际）中心线应限定在平行于基准平面 B、间距等于 0.01mm 的两平行平面之间
	面对基准线的平行度公差	公差带为间距等于公差值 t、平行于基准轴线的两平行平面所限定的区域 a —— 基准轴线	提取（实际）表面应限定在间距等于 0.1mm、平行于基准轴线 C 的两平行平面之间
	面对基准面的平行度公差	公差带为间距等于公差值 t、平行于基准平面的两平行平面所限定的区域 a —— 基准平面	提取（实际）表面应限定在间距等于 0.01mm、平行于基准平面 D 的两平行平面之间

（续）



几何特征及符号	公差带定义		标注和解释
垂直度 ⊥	线对基准体系的垂直度公差	公差带为间距等于公差值 t 的两平行平面所限定的区域，该两平行平面垂直于基准平面 A，且平行于基准平面 B a——基准平面 A b——基准平面 B	圆柱面的提取（实际）中心线应限定在间距等于 0.1mm 的两平行平面之间，该两平行平面垂直于基准平面 A，且平行于基准平面 B
		公差带为间距等于公差值 t_1 和 t_2，且相互垂直的两组平行平面所限定的区域，该两组平行平面都垂直于基准平面 A，其中一组平行平面垂直于基准平面 B，见图 a；而另一组平行平面平行于基准平面 B，见图 b a——基准平面 A b——基准平面 B a) a——基准平面 A b——基准平面 B b)	圆柱面的提取（实际）中心线应限定在间距等于 0.1mm 和 0.2mm，且相互垂直的两组平行平面内，该两组平行平面垂直于基准平面 A，且垂直或平行于基准平面 B

（续）

几何特征及符号		公差带定义	标注和解释
垂直度 ⊥	线对基准线的垂直度公差	公差带为间距等于公差值 t、垂直于基准轴线的两平行平面所限定的区域 a—— 基准线	提取（实际）中心线应限定在间距等于0.06mm、垂直于基准轴线 A 的两平行平面之间
	线对基准面的垂直度公差	公差带为直径等于公差值 ϕt、轴线垂直于基准平面的圆柱面所限定的区域 注意：公差值前加注符号 ϕ a—— 基准平面	圆柱面的提取（实际）中心线应限定在直径等于 ϕ0.01mm、垂直于基准平面 A 的圆柱面内
	面对基准线的垂直度公差	公差带为间距等于公差值 t 且垂直于基准轴线的两平行平面所限定的区域 a—— 基准轴线	提取（实际）表面应限定在间距等于0.08mm 的两平行平面之间，该两平行平面垂直于基准轴线 A
	面对基准面的垂直度公差	公差带为间距等于公差值 t、垂直于基准平面的两平行平面所限定的区域 a—— 基准平面	提取（实际）表面应限定在间距等于0.08mm 垂直于基准轴线 A 的两平行平面之间

（续）

几何特征及符号		公差带定义	标注和解释
倾斜度 ∠	线对基准线的倾斜度公差	被测线与基准线在同一平面上公差带为间距等于公差值 t 的两平行平面所限定的区域，该两平行平面按给定角度倾斜于基准轴线 α　a　t　a——基准轴线	提取（实际）中心线应限定在间距等于0.08mm的两平行平面之间。该两平行平面按理论正确角度60°倾斜于公共基准轴线 $A—B$ ∠ 0.08 A—B　60°　A　B
		被测线与基准线不在同一平面上公差带为间距等于公差值 t 的两平行平面所限定的区域，该两平行平面按给定角度倾斜于基准轴线 α　a　t　a——基准轴线	提取（实际）中心线应限定在间距等于0.08mm的两平行平面之间。该两平行平面按理论正确角度60°倾斜于公共基准轴线 $A—B$ ∠ 0.08 A—B　60°　A　B
	线对基准面的倾斜度公差	公差带为间距等于公差值 t 的两平行平面所限定的区域，该两平行平面按给定角度倾斜于基准平面 α　a　t　a——基准平面	提取（实际）中心线应限定在间距等于0.08mm的两平行平面之间，该两平行平面按理论正确角度60°倾斜于公共基准平面 A ∠ 0.08 A　60°　A

(续)

几何特征及符号		公差带定义	标注和解释
倾斜度 ∠	线对基准面的倾斜度公差	公差带为直径等于公差值 ϕt 的圆柱面所限定的区域，该圆柱面公差带的轴线按给定角度倾斜于基准平面 A 且平行于基准平面 B 注意：公差值前加注符号 ϕ a——基准平面 A b——基准平面 B	提取（实际）中心线应限定在直径等于 ϕ0.1mm 的圆柱面内，该圆柱面的中心线按理论正确角度 60°倾斜于公共基准平面 A 且平行于基准平面 B ∠ | ϕ0.1 | A | B 60°
	面对基准线的倾斜度公差	公差带为间距等于公差值 t 的两平行平面所限定的区域，该两平行平面按给定角度倾斜于基准轴线 a——基准轴线	提取（实际）表面应限定在间距等于 0.1mm 的两平行平面之间，该两平行平面按理论正确角度 75°倾斜于基准轴线 A ∠ | 0.1 | A 75°
	面对基准面的倾斜度公差	公差带为间距等于公差值 t 的两平行平面所限定的区域，该两平行平面按给定角度倾斜于基准平面 a——基准平面	提取（实际）表面应限定在间距等于 0.08mm 的两平行平面之间，该两平行平面按理论正确角度 40°倾斜于公共基准平面 A ∠ | 0.08 | A 40°

（续）

几何特征及符号	公差带定义		标注和解释
线轮廓度 ⌒	相对于基准体系的线轮廓度公差	公差带为直径等于公差值 t、圆心位于由基准平面 A 和基准平面 B 确定的被测要素理论正确几何形状上一系列圆球的两包络线所限定的区域 a——基准平面 A b——基准平面 B c——平行于基准 A 的平面	在任一平行于图示投影面的截面内，提取（实际）轮廓线应限定在直径等于 0.04mm、圆心位于由基准平面 A 和基准平面 B 确定的被测要素理论正确几何形状上的一系列圆的两等距离包络线之间
面轮廓度 ⌓	相对于基准的面轮廓度公差	公差带为直径等于公差值 t、球心位于由基准平面 A 确定的被测要素理论正确几何形状上的一系列圆球的两包络面所限定的区域 a——基准平面	提取（实际）轮廓面应限定在直径等于 0.1mm、球心位于由基准平面 A 确定的被测要素理论正确几何形状上的一系列圆球的两等距离包络面之间

4.3.3 位置公差及公差带

位置公差是指关联实际要素对基准在位置上允许的变动全量，包括位置度、同轴（同心）度、对称度。位置公差带定义、标注示例和解释见表 4-7。

表 4-7 位置公差带定义、标注示例和解释

几何特征及符号		公差带定义	标注示例及解释
位置度 ⌖	点的位置度公差	公差带为直径等于公差值 $S\phi t$ 的圆球面所限定的区域。该圆球面中心的理论正确位置由基准平面 A、B、C 和理论正确尺寸确定 注意：公差值前加注符号 $S\phi$ a——基准平面 A b——基准平面 B c——基准平面 C	提取（实际）球心应限定在直径等于 $S\phi0.3$mm 的圆球内，该圆球的中心由基准平面 A、基准平面 B、基准平面 C 和理论正确尺寸 30mm、25mm 确定 ⌖ $S\phi0.3$ A B C
	线的位置度公差	当给定一个方向的公差时，公差带为间距等于公差值 t、对称于线的理论正确位置的两平行平面所限定的区域，线的理论正确位置由基准平面 A、B 和理论正确尺寸确定 a——基准平面 A b——基准平面 B	各条刻线的提出（实际）中心线应限定在间距等于 0.1mm、对称于基准平面 A、B 和理论正确尺寸 20mm、10mm 确定的理论正确位置的两平行平面之间 8×ϕ12 ⌖ 0.05 C A B 8×ϕ12 ⌖ 0.2 C A
		当给定两个方向的公差时，公差带为间距等于公差值 t_1 和 t_2、对称于线的理论正确位置的两对相互垂直的平行平面所限定的区域，线的理论正确位置由基准平面 C、A 和 B 及理论正确尺寸确定，如图 a 和 b 所示 a——基准平面 A b——基准平面 B c——基准平面 C a)	各孔的提出（实际）中心线在给定方向上应各自限定在间距等于 0.05mm 和 0.2mm 且相互垂直的两对平行平面内。每对平行平面对称于由基准平面 C、A、B 和理论正确尺寸 20mm、15mm、30mm 确定的各孔轴线的理论正确位置 8×ϕ12 ⌖ 0.05 C A B 8×ϕ12 ⌖ 0.2 C A

（续）

几何特征及符号	公差带定义		标注示例及解释
位置度 ⌖	线的位置度公差	b) a——基准平面 A b——基准平面 B c——基准平面 C	
		公差带为直径等于公差值 ϕt 的圆柱面所限定的区域，该圆柱面轴线的位置由基准平面 A、B、C 和理论正确尺寸确定 注意：公差值前加注符号 ϕ a——基准平面 A b——基准平面 B c——基准平面 C	各提取（实际）中心线应各自限定在直径等于 ϕ0.1mm 的圆柱面内。该圆柱面的轴线应处于由基准平面 C、A、B 和理论正确尺寸 20mm、15mm、30mm 确定的各孔轴线的理论正确位置上
	轮廓平面或中心平面的位置度公差	公差带为间距等于公差值 t 且对称于被测面的理论正确位置的两平行平面所限定的区域，面的理论正确位置由基准平面 A、基准轴线 B 和理论正确尺寸确定 a——基准平面 b——基准轴线	提取（实际）表面应限定在间距等于 0.05mm 且对称于被测面的理论正确位置的两平行平面之间，该两平行平面对称于由基准平面 A、基准轴线 B 和理论正确尺寸 15mm、105°确定的被测面的理论正确位置

（续）

几何特征及符号		公差带定义	标注示例及解释
位置度 ⌖	轮廓平面或中心平面的位置度公差		提取（实际）中心面应限定在间距等于0.05mm的两平行平面之间，该两平行平面对称于由基准平面 *A* 和理论正确角度45°确定的被测面的理论正确位置 8×3.5±0.05 ⌖ 0.05 A A
同轴度和同心度 ◎	点的同心度公差	公差带为直径等于公差值 ϕt 的圆周所限定的区域，该圆周的圆心与基准点重合 注意：公差值前加注符号 ϕ ϕt *a* *a*——基准点	在任意横截面内，内圆的提取（实际）中心应限定在直径等于 ϕ0.1mm，以基准点 *A* 为圆心的圆周内 A ACS ◎ ϕ0.1 A
	轴线的同轴度公差	公差带为直径等于公差值 ϕt 的圆柱面所限定的区域，该圆柱面的轴线与基准轴线重合 注意：公差值前加注符号 ϕ ϕt *a* *a*——基准轴线	大圆柱面的提取（实际）中心线应限定在直径等于 ϕ0.08mm、以公共基准轴线 *A*—*B* 为轴线的圆柱面内 ◎ ϕ0.08 A—B A B ϕ ϕ ϕ
			大圆柱面的提取（实际）中心线应限定在直径等于 ϕ0.1mm、以基准轴线 *A* 为轴线的圆柱面内 A ◎ ϕ0.1 A

（续）

几何特征及符号	公差带定义		标注示例及解释
同轴度和同心度 ◎	轴线的同轴度公差		大圆柱面的提取（实际）中心线应限定在直径等于 ϕ0.1mm、以垂直于基准平面 A 的基准轴线 B 为轴线的圆柱面内 ◎ ϕ0.1 A B
对称度 ≡	中心面的对称度	公差带为间距等于公差值 t，对称于基准中心平面的两平行平面所限定的区域 t $t/2$ a a—— 基准中心平面	提取（实际）中心面应限定在间距等于0.08mm、对称于基准中心平面 A 的两平行平面之间 ≡ 0.08 A
			提取（实际）中心面应限定在间距等于0.08mm、对称于公共基准中心平面 A—B 的两平行平面之间 ≡ 0.08 A—B

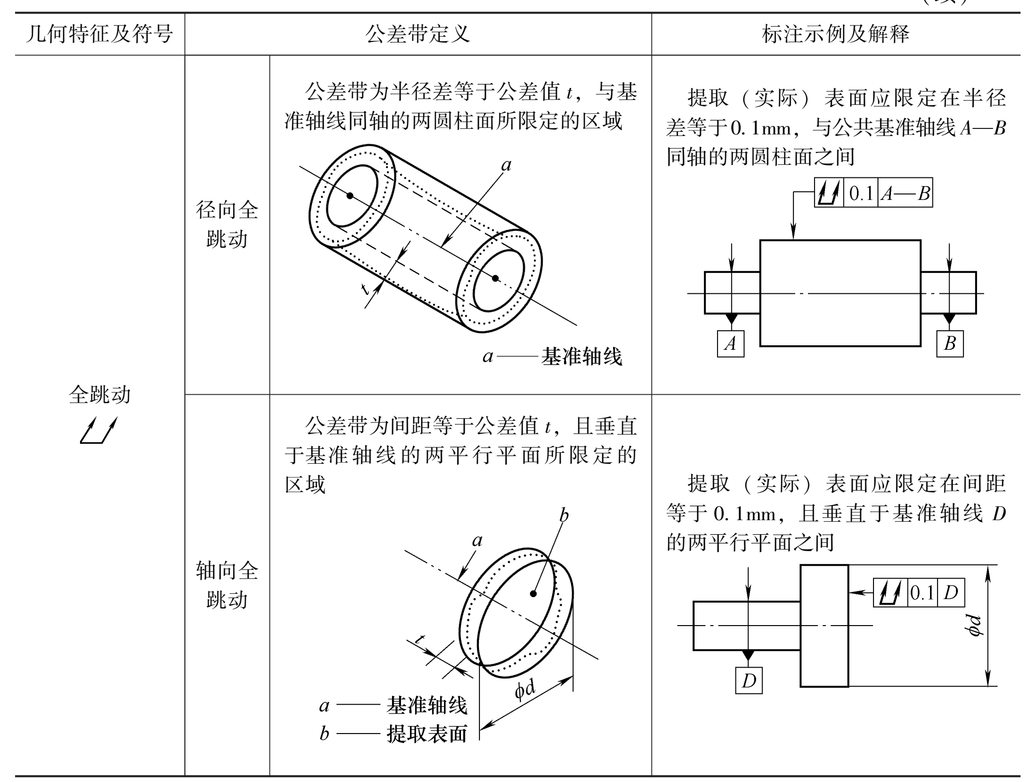
4.3.4 跳动公差及公差带

跳动公差是指关联实际要素绕基准回转一周或连续回转时所允许的最大跳动量，包括圆跳动和全跳动两种，其中圆跳动又分为径向、轴向和斜向圆跳动三种，全跳动又分为径向和轴向全跳动两种。跳动公差带定义、标注示例和解释见表4-8。

表 4-8 跳动公差带定义、标注示例和解释

<table>
<tr><th>几何特征及符号</th><th colspan="2">公差带定义</th><th>标注示例及解释</th></tr>
<tr><td rowspan="3">圆跳动
↗</td><td>径向圆跳动</td><td>公差带为在任一垂直于基准轴线的横截面内、半径差等于公差值 t、圆心在基准轴线上的两同心圆所限定的区域
a—— 基准轴线
b—— 横截面</td><td>在任一垂直于基准轴线 A 的横截面内，提取（实际）圆面应限定在半径差等于 0.8mm，圆心在基准轴线 A 上的两同心圆之间
↗ 0.8 A</td></tr>
<tr><td>轴向圆跳动</td><td>公差带为与基准轴线同轴的任一半径的圆柱截面上，轴向距离等于公差值 t 的两圆所限定的圆柱面区域
a——基准轴线
b——公差带
c——任意直径</td><td>在与基准轴线 D 同轴的任一圆柱形截面上，提取（实际）圆应限定在轴向距离等于 0.1mm 的两个等圆之间
↗ 0.1 D</td></tr>
<tr><td>斜向圆跳动</td><td>公差带为与基准轴线同轴的某一圆锥截面上，间距等于公差值 t 的两圆所限定的圆柱面区域
除非另有规定，测量方向应沿被测表面的法向
a——基准轴线
b——公差带</td><td>在与基准轴线 C 同轴的任一圆锥截面上，提取（实际）线应限定在素线方向间距等于 0.1mm 的两个不等圆之间
↗ 0.1 C</td></tr>
</table>

（续）



几何特征及符号		公差带定义	标注示例及解释
全跳动 ⌰	径向全跳动	公差带为半径差等于公差值 t，与基准轴线同轴的两圆柱面所限定的区域 a——基准轴线	提取（实际）表面应限定在半径差等于0.1mm，与公共基准轴线 A—B 同轴的两圆柱面之间
	轴向全跳动	公差带为间距等于公差值 t，且垂直于基准轴线的两平行平面所限定的区域 a——基准轴线 b——提取表面	提取（实际）表面应限定在间距等于0.1mm，且垂直于基准轴线 D 的两平行平面之间

4.4　公差原则与应用

4.4.1　公差原则的基本术语及定义

1. 局部实际尺寸（D_a、d_a）

局部实际尺寸又称为实际尺寸，即在实际要素的任意正截面上两对应点之间测得的距离。孔、轴的实际尺寸分别用 D_a 和 d_a 表示。对同一要素在不同部位测量，测得的局部实际尺寸不同。

2. 作用尺寸定义及公式

（1）体外作用尺寸（D_{fe}、d_{fe}）　在被测要素的给定长度上，与实际内表面体外相接的最大理想面或与实际外表面体外相接的最小理想面的直径或宽度，如图4-24所示。对于关联要素，该理想面的轴线或中心平面必须与基准保持图样给定的几何关系。孔、轴的体外作用尺寸分别用 D_{fe}、d_{fe}表示，其计算公式如下：

$$\begin{cases} D_{fe} = D_a - f \\ d_{fe} = d_a + f \end{cases} \tag{4-1}$$

式中　D_a、d_a——孔、轴的实际尺寸；

f——几何误差。

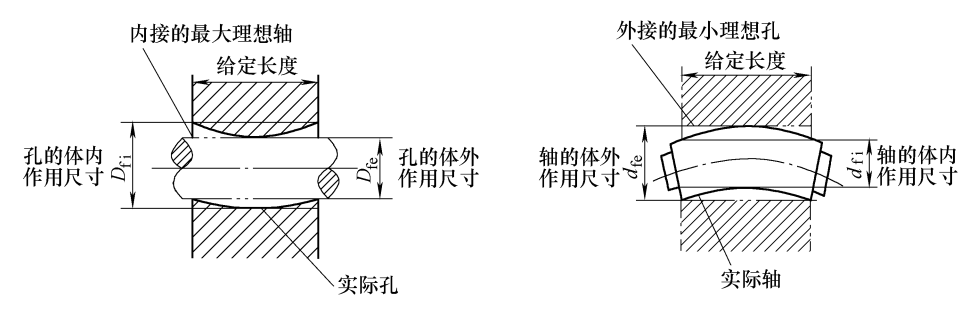


图 4-24　作用尺寸

（2）体内作用尺寸（D_{fi}、d_{fi}）　在被测要素的给定长度上，与实际内表面体内相接的最小理想面或与实际外表面体内相接的最大理想面的直径或宽度，如图 4-24所示。对于关联要素，该理想面的轴线或中心平面必须与基准保持图样给定的几何关系。孔、轴的体内作用尺寸分别用 D_{fi}、d_{fi}表示，其计算公式如下：

$$\begin{cases} D_{fi} = D_a + f \\ d_{fi} = d_a - f \end{cases} \tag{4-2}$$

式中　D_a、d_a——孔、轴的实际尺寸；

f——几何误差。

3. 最大实体状态、尺寸及边界

（1）最大实体状态（MMC）　指提取组成要素的局部尺寸在给定长度上处处位于极限尺寸且使其具有最大实体时的状态。

（2）最大实体尺寸（MMS）　指处于最大实体状态下的尺寸。孔、轴的最大实体尺寸分别用 D_M、d_M 表示。公式表示为

$$\begin{cases} D_M = D_{min} \\ d_M = d_{max} \end{cases} \tag{4-3}$$

（3）最大实体边界（MMB）　指尺寸为最大实体尺寸的边界。

4. 最小实体状态、尺寸及边界

（1）最小实体状态（LMC）　指提取组成要素的局部尺寸在给定长度上处处位于极限尺寸且使其具有最小实体时的状态。

（2）最小实体尺寸（LMS）　指处于最小实体状态下的尺寸。孔、轴的最小实体尺寸分别用 D_L、d_L 表示。公式表示为

$$\begin{cases} D_L = D_{max} \\ d_L = d_{min} \end{cases} \tag{4-4}$$

（3）最小实体边界（LMB）　指尺寸为最小实体尺寸的边界。

5. 最大实体实效状态、尺寸及边界

（1）最大实体实效状态（MMVC）　指在给定长度上，尺寸要素的最大实体尺寸与导出要素的几何公差（形状、方向、位置和跳动）共同作用产生的状态。

（2）最大实体实效尺寸（MMVS）　指处于最大实体实效状态下的尺寸。孔、轴的最大实体实效尺寸分别用 D_{MV}、d_{MV}表示。公式表示为

$$\begin{cases} D_{MV} = D_{min} - t \\ d_{MV} = d_{max} + t \end{cases} \tag{4-5}$$

（3）最大实体实效边界（MMVB）　指尺寸为最大实体实效尺寸的边界。

6. 最小实体实效状态、尺寸及边界

（1）最小实体实效状态（LMVC）　最小实体实效状态是指尺寸要素的最小实体尺寸与导出要素的几何公差（形状、方向、位置和跳动）共同作用产生的状态。

（2）最小实体实效尺寸（LMVS）　指处于最小实体实效状态下的尺寸。孔、轴的最小实体实效尺寸分别用 D_{LV}、d_{LV}表示。公式表示为

$$\begin{cases} D_{LV} = D_{max} + t \\ d_{LV} = d_{min} - t \end{cases} \tag{4-6}$$

（3）最小实体实效边界（LMVB）　指尺寸为最小实体实效尺寸的边界。

4.4.2　独立原则

独立原则是指图样上给定的尺寸公差和几何公差要求均是独立的，应分别满足各自的要求。它是几何公差和尺寸公差相互关系所遵循的基本原则。采用独立原则时，在图样上不附加任何标注。独立原则的适用范围较广，主要应用于零件的几何公差要求较高的场合，例如印刷机的滚筒重点控制圆柱度误差。

图 4-25 所示为采用独立原则的示例，该轴的提取要素的局部尺寸必须位于 ϕ25.965 ~ ϕ26mm 之间，而不论轴的提取要素的局部尺寸为何值，其轴线的直线度误差都不允许大于 ϕ0.02mm。

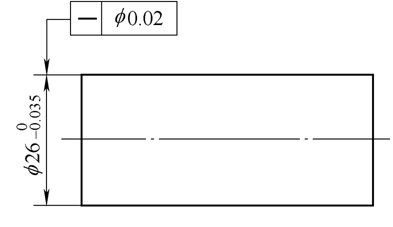


图 4-25　独立原则

4.4.3　相关要求

1. 包容要求

（1）包容要求的含义　包容要求表示提取组成要素不得超越其最大实体边界（MMB），其局部实际尺寸不得超出最小实体尺寸（LMS）。采用包容要求的单一要素，应在其尺寸极限偏差或尺寸公差带代号之后加注符号Ⓔ。包容要求是控制要素的实际尺寸偏离最大实体尺寸时，允许其形状误差增大。它反映了尺寸公差与形状公差之间的补偿关系。

（2）应用及示例分析　采用包容要求的合格条件是体外作用尺寸不得超过其最大实体尺寸，且局部尺寸不得小于其最小实体尺寸。即

内表面（孔）$D_{fe} \geqslant D_M$，$D_M \leqslant D_a \leqslant D_L$

外表面（轴）$d_{fe} \leqslant d_M$，$d_L \leqslant d_a \leqslant d_M$

根据上述合格条件分析可知：

1）当要素实际尺寸处处为最大实体尺寸时，不允许有任何的形状误差，即误差为零。

2）当要素实际尺寸偏离最大实体尺寸时，其偏离量允许补偿给几何误差，补偿量为

$$f_{补} = \text{MMS} - d_a\ (D_a)$$

3）当要素实际尺寸偏离至最小实体尺寸时，其几何误差补偿量达到最大值。

采用包容要求的示例如图 4-26a 所示，提取圆柱面应在其最大实体边界（MMB）之内，该界的尺寸为最大实体尺寸（MMS）ϕ150mm，其局部尺寸不得小于 ϕ149.96mm。提取圆柱面在其最大实体边界内可为任意纵截面形状及横截面形状，如图 4-26b ~ e 所示。

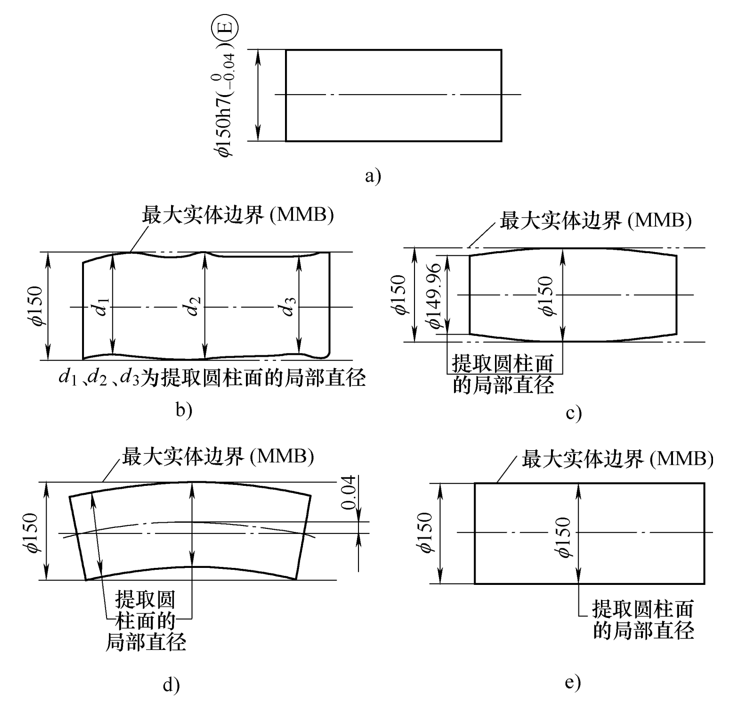


图 4-26　包容要求

（3）适用场合　采用包容要求，尺寸公差不仅限制了实际组成要素的尺寸，

还控制了要素的形状误差。包容要求主要应用于形状公差，保证配合性质，特别是配合公差较小的精密配合，用最大实体边界来保证所要求的最小间隙或最大过盈，用最小实体尺寸来防止间隙过大或过盈过小。

2. 最大实体要求

（1）最大实体要求的含义　在应用最大实体要求时，要求被测要素的实际轮廓处处不得超越最大实体实效边界。当其实际（组成）要素的尺寸偏离最大实体尺寸时，允许其几何误差值超出图样上给定的公差值，而提取组成要素的局部尺寸应在最大实体尺寸和最小实体尺寸之间。最大实体要求应用于被测要素时，应在被测要素公差框格中的公差值后标注符号Ⓜ，如图4-27a所示；应用于基准要素时，应在几何公差框格基准字母代号后标注符号Ⓜ，如图4-27b所示。



图4-27　最大实体要求的标注

（2）应用及示例分析

1）最大实体要求应用于被测要素。当最大实体要求应用于被测要素时，被测要素的实际轮廓在给定的长度上处处不得超出最大实体实效边界，即其体外作用尺寸不得超出最大实体实效尺寸，且其局部实际尺寸不得超出最大实体尺寸和最小实体尺寸。

当最大实体要求应用于被测要素时，被测要素的几何公差值是在该要素处于最大实体状态时给出的。当被测要素的实际轮廓偏离其最大实体状态，即其实际尺寸偏离最大实体尺寸时，几何误差值可超出在最大实体状态下给出的几何公差值，即此时的几何公差值可以增大。

内表面（孔）$D_{fe} \geqslant D_{MV}$，$D_M \leqslant D_a \leqslant D_L$

外表面（轴）$d_{fe} \leqslant d_{MV}$，$d_L \leqslant d_a \leqslant d_M$

图4-28a所示为最大实体要求应用于被测要素，轴的最大实体尺寸为ϕ20mm，最大实体实效尺寸为ϕ20.1mm。当实际尺寸偏离最大实体尺寸，且为最小实体尺寸ϕ19.7mm时，允许的直线度误差为$\phi(0.3+0.1)\text{mm}=\phi0.4\text{mm}$，如图4-28b所示；当时实际尺寸处于最大实体尺寸时，允许的直线度误差为ϕ0.1mm，如图4-28c所示；其动态公差图如4-28d所示，随着实际尺寸偏离最大实体尺寸，实际尺寸越小，允许的补偿给直线度公差值越大，且呈现一次线性变化。

2）最大实体要求应用于基准要素。基准要素的边界与其本身是否采用最大实体要求有关。当基准要素本身采用最大实体要求时，则其相应的边界为最大实体实效边界，即被测要素的几何公差是在基准要素处于最大实体实效状态时给定的；当基准要素本身不采用最大实体要求时，其边界为最大实体边界。

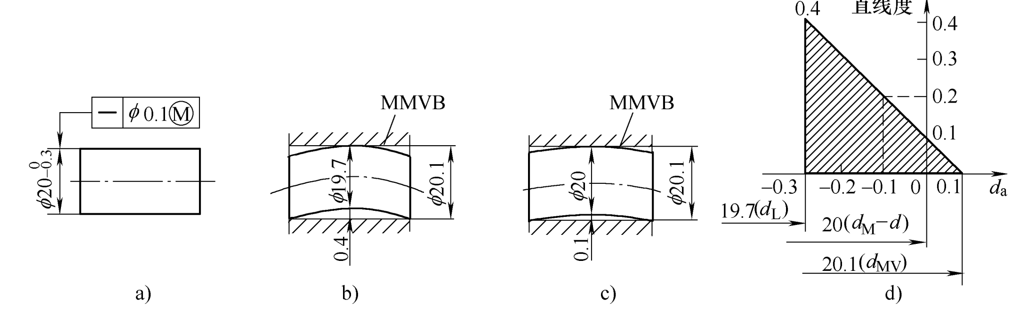


图 4-28 最大实体要求应用于被测要素

图 4-29 所示为最大实体要求同时应用于被测要素和基准要素，该零件的要求是：当被测要素处于最大实体状态时，其中心线对基准轴线的同轴度公差为 ϕ0. 1mm，被测要素轴 1 应用最大实体要求，理想边界为最大实体实效边界且最大实体实效尺寸 $d_{MV}=\phi30.1$mm；而基准轴 2 采用独立原则，应遵守最大实体边界，其体外作用尺寸等于最大实体尺寸 ϕ20mm。当基准轴 2 为 ϕ20mm，而被测要素为最小实体尺寸 $d_{1L}=\phi29.97$mm 时，此时被测轴 1 的实际（组成）要素的尺寸偏离最大实体尺寸 $d_{1M}=\phi30$mm 的偏离量为 ϕ（30 − 29. 97） mm = ϕ0. 03mm，该偏离量可以补偿同轴度，此时的同轴度允许误差可达 ϕ（0. 03 + 0. 1） mm = ϕ0. 13mm；当被测轴 1 和基准轴 2 都为最小实体尺寸时，由于基准轴 2 实际尺寸偏离了最大实体尺寸，因而基准轴 2 的轴线可有一个浮动量，即基准轴线可以在 ϕ（20 − 19. 7） mm = ϕ0. 3mm 范围内浮动。

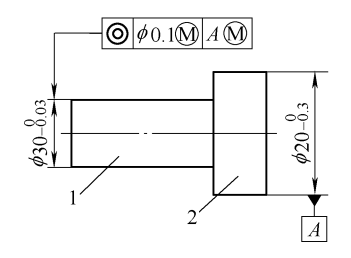


图 4-29 最大实体要求应用于基准要素

（3）应用场合 最大实体要求常应用于保证装配互换性场合，以便充分利用图样上给出的公差值，如零件尺寸精度和几何精度较低、配合性质要求不严的情况。当被测要素或基准要素偏离最大实体状态时，几何公差可以得到补偿，从而提高零件的合格率，具有显著的经济效益。

3. 最小实体要求

（1）最小实体要求的含义 在应用最小实体要求时，要求被测要素的实际轮廓处处不得超越最小实体实效边界。当其实际（组成）要素的尺寸偏离最小实体尺寸时，允许其几何误差值超出图样上给定的公差值，而提取组成要素的局部尺寸应在最大实体尺寸和最小实体尺寸之间。最小实体要求应用于被测要素时，应在被测要素公差框格中的公差值后标注符号Ⓛ，如图 4-30a所示；应用于基准要素时，应在几何

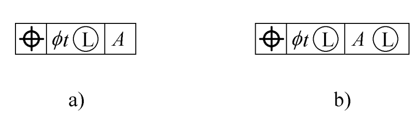


图 4-30 最小实体要求的标注

公差框格基准字母代号后标注符号Ⓛ，如图 4-30b 所示。

（2）应用及示例分析

1）最小实体要求应用于被测要素。当最小实体要求应用于被测要素时，被测要素的实际轮廓在给定的长度上处处不得超出最小实体实效边界，即其体内作用尺寸不得超出最小实体实效尺寸，且其局部实际尺寸不得超出最大实体尺寸和最小实体尺寸。

当最小实体要求应用于被测要素时，被测要素的几何公差值是在该要素处于最小实体状态时给出的。当被测要素的实际轮廓偏离其最小实体状态，即其实际尺寸偏离最小实体尺寸时，几何误差值可超出在最小实体状态下给出的几何公差值，即此时的几何公差值可以增大。

内表面（孔）$D_{fi} \leqslant D_{LV}$，$D_M \leqslant D_a \leqslant D_L$

外表面（轴）$d_{fi} \geqslant d_{LV}$，$d_L \leqslant d_a \leqslant d_M$

图 4-31a 所示为最小实体要求应用于被测要素，轴的最小实体尺寸为 ϕ29. 97mm，最小实体实效尺寸为 ϕ29. 95mm。当实际尺寸偏离最小实体尺寸，且为最大实体尺寸 ϕ30mm 时，允许的直线度误差为 ϕ（0. 03 + 0. 02） = ϕ0. 05mm，如图 4-31b 所示；动态公差图如图 4-31c 所示，随着实际尺寸偏离最小实体尺寸，实际尺寸越大，允许的补偿给直线度公差值越大，且呈现一次线性变化。

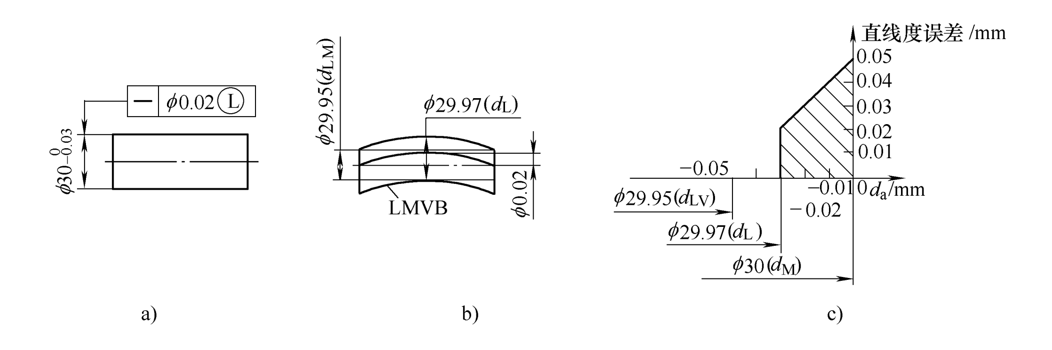


图 4-31　最小实体要求应用于被测要素

2）最小实体要求应用于基准要素。基准要素的边界与其本身是否采用最小实体要求有关。当基准要素本身采用最小实体要求时，则其相应的边界为最小实体实效边界，即被测要素的几何公差是在基准要素处于最小实体实效状态时给定的；当基准要素本身不采用最小实体要求，若基准要素的实际轮廓偏离其相应的边界时，则允许基准要素在一定的范围内浮动。

（3）适用场合　最小实体要求仅用于导出要素，因此，最小实体要求可用于保证孔件的最小壁厚和轴件的最小设计强度。在零件设计中，对薄壁结构和强度要求高的轴件，应考虑合理地应用最小实体要求以保证产品质量。

4. 可逆要求

可逆要求的含义是指导出要素的几何误差小于给出的几何公差时，允许在满足零件功能要求的前提下扩大尺寸公差，以获得更好的经济效益。可逆要求不单独使用，是最大实体要求或最小实体要求的附加要求。在公差值后面加注ⓂⓇ符号表示可逆要求应用于最大实体要求，公差值后面加注ⓁⓇ符号表示可逆要求应用于最大实体要求，如图 4-32所示。



图 4-32 可逆要求标注

（1）可逆要求应用于最大实体要求 图 4-33a 所示为中心轴线的直线度公差采用可逆的最大实体要求的示例。当该轴处于最大实体状态时，其中心线直线度公差为 ϕ0. 02mm，如图 4-33b 所示；若轴的直线度误差小于给出的公差值，则允许轴的实际尺寸超出其最大实体尺寸 ϕ30mm，但必须保证其体外作用尺寸不超出其最大实体实效尺寸 ϕ30. 02mm，所以当轴的中心线直线度误差为零（即具有理想形状）时，其实际尺寸可达最大值，即等于轴的最大实体实效尺寸 ϕ30. 02mm，其动态公差图如图 4-33c 所示。

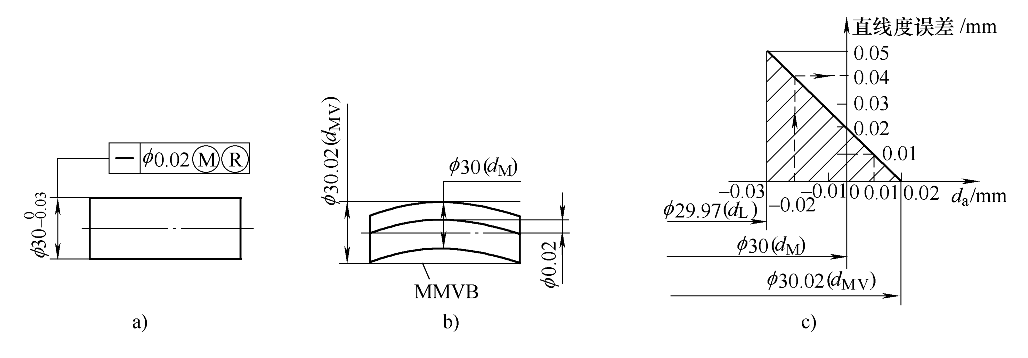


图 4-33 可逆要求应用于最大实体要求

（2）可逆要求应用于最小实体要求 图 4-34a 所示为中心轴线的位置度公差采用可逆的最小实体要求的示例。当该孔处于最小实体状态时，其中心轴线位置度公差为 ϕ0. 4mm，如图 4-34b 所示；若中心轴线的位置度误差小于给出的公差值，则允许孔的实际尺寸超出其最小实体尺寸 ϕ8. 25mm，但必须保证其体内作用尺寸不超出其最小实体实效尺寸 ϕ8. 65mm，所以当中心轴线位置度误差为零（即具有理想形状）时，其实际尺寸可达最大值，即等于孔的最大实体实效尺寸 ϕ8. 65mm，其动态公差图如图 4-34c 所示。

（3）适用场合 可逆要求用于只要求零件实际轮廓限定在某一控制边界内，不严格区分其尺寸和几何公差是否在允许范围内的情况。可逆要求用于最大实体要求主要应用于公差及配合无严格要求，仅要求保证装配互换的场合。可逆要求很少应用于最小实体要求。

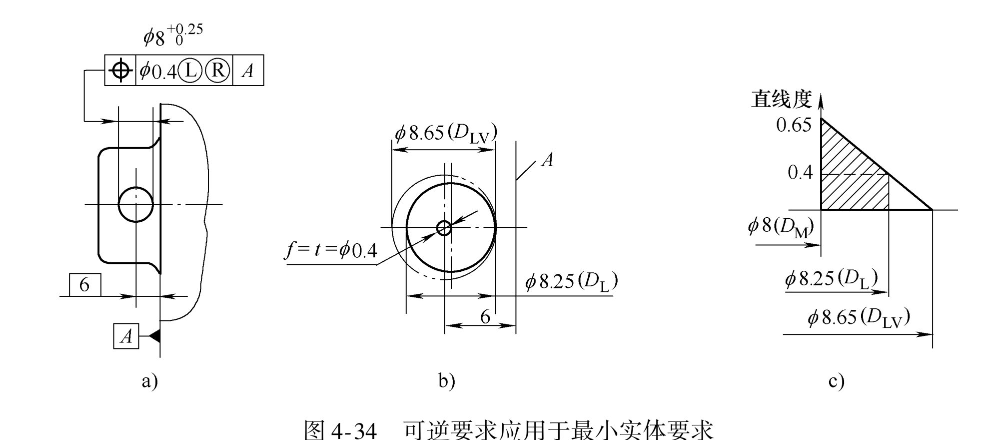


图 4-34 可逆要求应用于最小实体要求

4.5 几何公差的选择

为实现产品的互换性、保证产品的质量和降低制造成本，正确、合理地设计几何公差具有十分重要的意义。几何公差的选用主要包括几何公差项目的选择、公差原则的选择、基准的选择、公差等级与公差值的选择。

1. 几何公差特征项目的选择

几何公差特征项目的选择主要综合考虑被测要素的几何特征、功能要求和测量的方便性三个方面。

（1）零件的几何特征 形状公差项目主要是按要素的几何形状特征制订的，因此要素的几何特征自然是选择单一要素公差项目的基本依据。例如：控制平面的形状误差应选择平面度；控制导轨导向面的形状误差应选择直线度；控制圆柱面的形状误差应选择圆度或圆柱度等。

方向、位置、跳动公差项目是按要素间几何方位关系制订的，所以关联要素的公差项目应以它与基准间的几何方位关系为基本依据。对线（轴线）、面可规定方向和位置公差，对点只能规定位置公差，只有回转零件才规定同轴度公差和跳动公差。

（2）零件的功能要求 零件的功能要求不同，对几何公差应提出不同的要求，所以应分析几何误差对零件使用性能的影响。一般说来，平面的形状误差将影响支承面安置的平稳和定位可靠性，影响贴合面的密封性和滑动面的磨损；导轨面的形状误差将影响导向精度；圆柱面的形状误差将影响定位配合的连接强度和可靠性，影响转动配合的间隙均匀性和运动平稳性；轮廓表面或中心要素的位置误差将直接决定机器的装配精度和运动精度，如齿轮箱体上两孔轴线不平行将影响齿轮副的接触精度，降低承载能力。滚动轴承的定位轴肩与轴线不垂直，将影响轴承旋转时的精度等。

（3）检测的方便性 为了检测方便，有时可将所需的公差项目用控制效果相

同或相近的公差项目来代替。例如圆轴类零件，圆柱度是理想的项目，因为它综合控制了圆柱面的各种形状误差，但是由于圆柱度检测不便，故可选用圆度、直线度几个分项，或者选用径向跳动公差等进行控制。又如径向圆跳动可综合控制圆度和同轴度误差，而径向圆跳动误差的检测简单易行，所以在不影响设计要求的前提下，可尽量选用径向圆跳动公差项目。同样可近似地用端面圆跳动代替端面对轴线的垂直度公差要求。端面全跳动的公差带和端面对轴线的垂直度的公差带完全相同，可互相取代。

2. 几何公差原则的选择

几何公差原则的选择，应根据被测要素的功能要求、各公差原则的应用场合、可行性和经济性等方面来考虑，现列出独立原则、包容要求、最大实体要求和最小实体要求公差原则和要求的应用场合和示例，见表 4-9。

表 4-9　公差原则和要求的选择

公差原则	应用场合	示　　例
独立原则	尺寸精度与几何精度需要分别满足要求	齿轮箱体孔的尺寸精度与两孔轴线的平行度；连杆活塞销孔的尺寸精度与圆柱度；滚动轴承内、外圈滚道尺寸精度与形状精度
	尺寸精度与几何精度相差较大	平板的形状精度要求较高，尺寸精度无要求；滚筒类零件的尺寸精度要求较低，形状精度要求较高；冲模架的下模座无尺寸精度要求，平行度要求较高；通油孔的尺寸精度有一定的要求，形状精度无要求
	尺寸精度与几何精度无联系	发动机连杆上孔的尺寸精度与其中心线间的位置精度；齿轮箱体孔的尺寸精度与两孔中心线间的位置精度；滚子链条的套筒或滚子内、外圆柱面的中心线的同轴度与尺寸精度
	保证运动精度	导轨的形状精度要求严格，尺寸精度要求较低
	保证密封性	汽缸套的形状精度要求严格，尺寸精度要求较低
	未注公差	凡未注尺寸公差和未注几何公差的要素，都采用独立原则，例如退刀槽、倒角等
包容要求	保证配合性质	如孔 ϕ30H7Ⓔ和轴 ϕ30h6Ⓔ配合，可以保证最小间隙等于零
	尺寸精度与几何精度无严格比例关系要求	一般的孔与轴配合，只要求作用尺寸不超越最大实体尺寸，局部实际尺寸不超越最小实体尺寸
	保证关联作用尺寸不超过最大实体尺寸	关联要素的孔与轴的性质要求，标注 0 Ⓜ
最大实体要求	被测导出要素	保证自由装配，如轴承盖上用于穿过螺钉的通孔、法兰盘上用于穿过螺栓的通孔
	基准导出要素	基准轴线或中心平面相对理想边界中心允许偏离
最小实体要求	被测导出要素	保证孔件最小壁厚及轴件的最小强度
	基准导出要素	基准轴线或中心平面相对理想边界中心允许偏离

3. 基准的选择

基准是确定关联要素间方向或位置的依据。在考虑选择几何公差项目时，必然同时考虑要采用的基准，如选用单一基准、组合基准还是选用多基准。选择基准时，一般应考虑以下方面：

1）根据要素的功能及对被测要素间的几何关系来选择基准。如轴类零件，常以两个轴承为支承运转，其运动轴线是安装轴承的两轴颈公共轴线。因此，从功能要求和控制其他要素的位置精度来看，应选这两处轴颈的公共轴线（组合基准）为基准。

2）根据装配关系应选零件上相互配合、相互接触的定位要素作为各自的基准。如盘、套类零件多以其内孔轴线径向定位装配或以其端面轴向定位，因此根据需要可选其轴线或端面作为基准。

3）从零件结构考虑，应选较宽大的平面、较长的轴线作为基准，以使定位稳定。对结构复杂的零件，一般应选三个基准面，以确定被测要素在空间的方向和位置。

4）从加工、检验的角度考虑，应选择在夹具、检具中定位的相应要素为基准，一是可以消除因基准不统一而产生的误差，二是可以简化夹具、量具的设计与制造，并使测量方便。

4. 公差等级与公差值的选择

国家标准 GB/T 1184—1996 规定图样中标注的几何公差有两种形式：未注公差值和注出公差值。前者是依据标准用文字说明的形式给出未注公差值，后者是在公差框格内直接标注出公差值。

注出几何公差要求的几何精度高低是用公差等级数字的大小来表示的。对 14 项几何公差特征（除线面轮廓度及位置度未规定公差等级外），一般划分为 12 级，即 1、2、…、12 级，1 级为最高级，公差等级依次降低，公差值依次增大。其中，圆度和圆柱度公差为 13 级，即 0、1、2、…、12 级，0 级为最高级，公差等级依次降低，公差值依次增大。各几何公差等级的公差值见表 4-10 ~ 表 4-14。

表 4-10　直线度、平面度（摘自 GB/T 1184—1996）

主参数 L/mm	公差等级											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	公差值/μm											
≤10	0. 2	0. 4	0. 8	1. 2	2	3	5	8	12	20	30	60
>10 ~ 16	0. 25	0. 5	1	1. 5	2. 5	1	6	10	15	25	40	80
>16 ~ 25	0. 3	0. 6	1. 2	2	3	5	8	12	20	30	50	100
>25 ~ 40	0. 4	0. 8	1. 5	2. 5	4	6	10	15	25	40	60	120
>40 ~ 63	0. 5	1	2	3	5	8	00	20	30	50	80	150
>63 ~ 100	0. 6	1. 2	2. 5	4	6	10	15	25	40	60	100	200
>100 ~ 160	0. 8	1. 5	3	5	8	12	20	30	50	80	120	250
>160 ~ 250	1	2	4	6	10	15	25	40	60	100	150	300

注：L 为被测要素的长度。

表 4-11　圆度、圆柱度（摘自 GB/T 1184—1996）

主参数 d（D）/mm	公差等级												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	公差值/μm												
>6 ~ 10	0.12	0.25	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	15	22	36
>10 ~ 18	0.15	0.25	0.5	0.8	1.2	2	3	5	8	11	18	27	43
>18 ~ 30	0.2	0.3	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	13	21	33	52
>30 ~ 50	0.25	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	7	11	16	25	39	62
>50 ~ 80	0.3	0.5	0.8	1.2	2	3	5	8	13	19	30	46	74
>80 ~ 120	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	6	10	15	22	35	54	87
>120 ~ 180	0.6	1	1.2	2	3.5	5	8	12	18	25	40	63	100
>180 ~ 250	0.8	1.2	2	3	4.5	7	10	14	20	29	46	72	115

注：*d*（*D*）为被测要素的直径。

表 4-12　平行度、垂直度、倾斜度（摘自 GB/T 1184—1996）

主参数 L/mm	公差等级											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	公差值/μm											
≤10	0.4	0.8	1.5	3	5	8	12	20	30	50	80	120
>10 ~ 16	0.5	1	2	4	6	10	15	25	40	60	100	150
>16 ~ 25	0.6	1.2	2.5	5	8	12	20	30	50	80	120	200
>25 ~ 40	0.8	1.5	3	6	10	15	25	40	60	100	150	250
>40 ~ 63	1	2	4	8	12	20	30	50	80	120	200	300
>63 ~ 100	1.5	2.5	5	10	15	25	40	60	100	150	250	400
>100 ~ 160	1.5	3	6	1	20	30	50	80	120	200	300	500
>160 ~ 250	2	4	6	15	25	40	60	100	150	250	400	600

注：*L* 为被测要素的长度。

表 4-13　同轴度、对称度、圆跳动、全跳动（摘自 GB/T 1184—1996）

主参数 d（D）、B/mm	公差等级											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	公差值/μm											
>6 ~ 10	0.6	1	1.5	2.5	4	6	10	15	30	60	100	200
>10 ~ 18	0.8	1.2	2	3	5	8	12	20	40	80	120	250
>18 ~ 30	1	1.5	2.5	4	6	10	15	25	50	100	150	300
>30 ~ 50	1.2	2	3	5	8	12	20	30	60	120	200	400
>50 ~ 80	1.5	2.5	4	6	10	15	25	40	80	150	250	500
>80 ~ 120	2	3	5	8	12	20	30	50	100	200	300	600

注：*d*（*D*）、*B* 为被测要素的直径、宽度。

表 4-14　位置度系数（摘自 GB/T 1184—1996）

1	1.2	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8
1×10^n	1.2×10^n	1.5×10^n	2×10^n	2.5×10^n	3×10^n	4×10^n	5×10^n	6×10^n	8×10^n

注：n 为整数。

几何公差值的选择确定是以在满足零件功能要求的前提下，兼顾工艺的经济性的检测条件，尽量选取较大的公差值。常用类比法确定，主要应考虑以下因素：

（1）几何公差和尺寸公差的关系　同一要素上给定的形状公差值应小于方向、位置公差值，方向公差值应小于位置公差值，即 $t_{形状}<t_{方向}<t_{位置}<t_{尺寸}$。例如对相互平行的平面的几何公差要求，平面度公差值应小于该平面对基准平面的平行度公差值；平行度公差值应小于其相应距离的尺寸公差值。

（2）形状公差和表面粗糙度的关系　一般来说，表面粗糙度 Ra 值约占形状公差值的 20%～25%。

（3）考虑零件的结构特点　对于刚性较差的零件（如细长轴、薄壁件）、跨距较大的轴和孔、宽度较大的零件表面等，在满足零件的功能要求下，可适当降低 1～2 级选用。

（4）位置度公差的计算　位置度公差通常需要经过计算确定，对用螺栓连接两个或两个以上零件时，若被连接零件均为光孔，则光孔的位置度公差的计算公式为

螺栓连接：$t\leqslant kX_{\min}$

螺钉连接：$t\leqslant 0.5X_{\min}$

式中　k——间隙利用系数，推荐值：不需要调整的固定连接，$k=1$；需要调整的固定连接，$k=0.6\sim0.8$。

带入上式计算，经圆整后查表选取位置度公差值。

由上述情况分析，现将列出一些几何公差等级适用场合，见表 4-15～表 4-18。

表 4-15　直线度、平面度几何公差等级的应用举例

公差等级	应用举例
5	1 级平板，2 级宽平尺，平面磨床的纵导轨、垂直导轨、立柱导轨以及工作台，液压龙门刨床和六角车床导轨，柴油机进气、排气阀门导轨
6	普通机床导轨面，如普通车床、龙门刨床、滚齿机、自动车床等的床身导轨、立柱导轨、柴油机壳
7	2 级平板，机床主轴箱、摇臂钻床底座和工作台，镗床工作台，液压泵盖，减速器壳体结合面
8	机床传动箱体，交换齿轮箱体，车床溜板箱，柴油机气缸体，连杆分离面，缸盖结合面，汽车发动机缸盖、曲轴箱结合面，液压管件和法兰连接面
9	3 级平板，自动车床身底面，摩托车曲轴箱体，汽车变速箱壳体，手动机械的支承面

表 4-16　圆度、圆柱度几何公差等级的应用举例

公差等级	应用举例
5	一般计量仪器主轴，测杆外圆圆柱，陀螺仪轴颈，一般机床主轴轴颈及主轴轴承孔，柴油机、汽油机活塞、活塞销，与6级滚动轴承配合的轴颈
6	仪表端盖外圆圆柱，一般机床主轴及箱体孔，泵、压缩机的活塞、气缸、汽车发动机凸轮轴，减速器轴颈，高速船用柴油机、拖拉机曲轴主轴颈，与6级滚动轴承配合的外壳孔，与0级滚动轴承配合的外壳孔
7	大功率低速柴油机曲轴轴颈、活塞、活塞销、连杆、气缸，高速柴油机箱体轴承孔，千斤顶或压力液压缸活塞，汽车传动轴，水泵及通用减速器轴颈，与0级滚动轴承配合的外壳孔
8	大功率低速发动机，压气机连杆盖、活塞，拖拉机气缸体、活塞，印刷机传墨辊，内燃机曲轴轴颈，柴油机凸轮轴承孔、凸轮轴，拖拉机、小型船用柴油机汽缸套等
9	空气压缩机缸体，液压传动筒，通用机械杠杆与拉杆用套筒销子，拖拉机活塞环、套筒孔等

表 4-17　平行度、垂直度几何公差等级的应用举例

公差等级	应用举例
4，5	普通机床导轨、重要支承面，机床主轴孔对基准的平行度，精密机床重要零件，计量仪器、量具、模具的工作面和基准面，机床床头箱体重要孔，通用减速器壳体孔，齿轮泵的油孔端面，发动机和离合器的凸缘，气缸支承面，安装精密滚动轴承壳体孔的凸肩等
6，7，8	一般机床的工作面和基准面，压力机和锻锤的工作面，中等精度钻模的工作面，机床一般轴承孔对基准的平行度，变速器箱体孔，主轴花键对定心直径部位轴线的平行度，重型机械轴承盖端面，卷扬机、手动传动装置中的传动轴，一般导轨、主轴箱体孔，刀架，砂轮架，气缸配合面对基准轴线，活塞销孔对活塞中心线的垂直度，滚动轴承内、外圈端面对轴线的垂直度等
9，10	低精度零件，重型机械滚动轴承端盖，柴油机、煤气发动机箱体曲轴孔、曲轴颈、花键轴和轴肩端面，带式运输机法兰盘等端面对轴线的垂直度，手动卷扬机及传动装置中的轴承端面，减速器壳体平面等

表 4-18　同轴度、对称度、跳动几何公差等级的应用举例

公差等级	应用举例
5，6，7	应用范围较广的公差等级。用于几何精度要求较高、尺寸公差等级为IT8及高于IT8的零件。5级常用于机床主轴轴颈，计量仪器的测杆，汽轮机主轴，柱塞油泵转子，高精度滚动轴承外圈，一般精度滚动轴承内圈；6、7级用于内燃机曲轴、凸轮轴轴颈、齿轮轴、水泵轴、汽车后轮输出轴，电动机转子、印刷机传墨辊的轴颈、键槽等
8，9	常用于几何精度要求一般、尺寸公差等级为IT9～IT11的零件。8级用于拖拉机发动机分配轴轴颈，与9级精度以下齿轮相配的轴，水泵叶轮，离心泵体，棉花精梳机前后滚子、键槽等；9级用于内燃机汽缸套配合面、自行车中轴等

（5）未注几何公差的规定　为了简化图样，对一般机床或中等制造精度就能保证的几何精度，不必在图样上注出几何公差。采用未注几何公差的要素有如下要求：

1）对直线度、平面度、垂直度、对称度和圆跳动未注公差各规定了 H、K、L 三个公差等级。采用规定的未注公差值时，应在标题栏或技术要求中注出公差等级代号及标准代号，如“GB/T 1184—K”。其公差值见表 4-19 ~ 表 4-22。

2）圆度未注公差值等于直径公差值，但不能大于表 4-22 中的径向圆跳动值。

3）圆柱度未注公差由圆度、直线度和素线平行度的注出公差或未注公差控制。

4）平行度未注公差值等于尺寸公差值或直线度和平面度未注公差值中的较大者。

5）同轴度未注公差值可以和表 4-22 中规定的圆跳动的未注公差值相等。

6）线、面轮廓度，倾斜度，位置度和全跳动的未注公差值均应由各要素的注出或未注线性尺寸公差或角度公差控制。

表 4-19　直线度和平面度的未注公差值

公差等级	基本长度范围/mm					
	≤10	>10 ~ 30	>30 ~ 100	>100 ~ 300	>300 ~ 1000	>1000 ~ 3000
H	0.02	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4
K	0.05	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
L	0.1	0.2	0.4	0.8	1.2	1.6

表 4-20　垂直度的未注公差值

公差等级	基本长度范围/mm			
	≤100	>100 ~ 300	>300 ~ 1000	>1000 ~ 3000
H	0.2	0.3	0.4	0.5
K	0.4	0.6	0.8	1
L	0.6	1	1.5	2

表 4-21　对称度的未注公差值

<table>
<tr><td rowspan="2">公差等级</td><td colspan="4">基本长度范围/mm</td></tr>
<tr><td>≤100</td><td>>100 ~ 300</td><td>>300 ~ 1000</td><td>>1000 ~ 3000</td></tr>
<tr><td>H</td><td colspan="4">0.5</td></tr>
<tr><td>K</td><td colspan="2">0.6</td><td>0.8</td><td>1</td></tr>
<tr><td>L</td><td>0.6</td><td>1</td><td>1.5</td><td>2</td></tr>
</table>

表 4-22　圆跳动的未注公差值

公差等级	圆跳动公差值/mm
H	0.1
K	0.2
L	0.5

自测习题四

一、填空题

1. 当被测要素和基准要素为______要素时，几何公差代号的指引线箭头或基准代号的连线应与该要素轮廓的尺寸线对齐。

2. 对同一被测要素，形状公差值应______位置公差值，位置公差值应______相应的尺寸公差值。

3. 图样上规定键槽对轴的对称度公差为0.05mm，则该键槽中心偏离轴的轴线距离不得大于______。

4. 某孔尺寸为$\phi40^{+0.119}_{+0.030}$mm，轴线直线度公差为$\phi0.005$mm，实测得其局部尺寸为$\phi40.09$mm，轴线直线度误差为$\phi0.003$mm，则孔的最大实体尺寸是______ mm，最小实体尺寸是______ mm，作用尺寸是______ mm。

5. 某轴尺寸为$\phi40^{+0.041}_{+0.030}$mm，轴线直线度公差为$\phi0.005$mm，实测得其局部尺寸为$\phi40.031$ mm，轴线直线度误差为$\phi0.003$mm，则轴的最大实体尺寸是______ mm，最大实体实效尺寸是______ mm，作用尺寸是______ mm。

二、判断题

1. 基准要素为中心要素时，基准符号应该与该要素的轮廓要素尺寸线错开。 (   )

2. 某平面对基准平面的平行度误差为0.05mm，那么这平面的平面度误差一定不大于0.05mm。 (   )

3. 作用尺寸是由局部几何误差综合形成的理想边界尺寸。对一批零件来说，若已知给定的尺寸公差值和几何公差值，则可以分析计算出作用尺寸。 (   )

4. 尺寸公差与几何公差采用独立原则时，零件加工的实际尺寸和几何误差中有一项超差，则该零件不合格。 (   )

5. 可逆要求应用于最大实体要求时，当其几何误差小于给定的几何公差，允许实际尺寸超出最大实体尺寸。 (   )

三、不定项选择题

1. 属于几何公差的有______。

A. 圆柱度　　B. 平面度　　C. 同轴度

D. 圆跳动　　E. 平行度

2. 下列论述正确的有______。

A. 给定方向上的线位置度公差值前应加注符号“ϕ”

B. 空间中，点位置度公差值前应加注符号“$S\phi$”

C. 任意方向上线倾斜度公差值前应加注符号“ϕ”

D. 标注斜向圆跳动时，指引线箭头应与轴线垂直

E. 标注圆锥面的圆度公差时，指引线箭头应指向圆锥轮廓面的垂直方向

3. 几何公差带形状是直径为公差值 t 的圆柱面内区域的有______。

A. 径向全跳动　　B. 端面全跳动

C. 同轴度　　D. 任意方向线位置度

E. 任意方向线对线的平行度

4. 几何公差带形状是距离为公差值 t 的两平行平面内区域的有______。

A. 平面度　　B. 任意方向的线的直线度

C. 给定一个方向的线的倾斜度　　D. 任意方向的线的位置度

E. 面对面的平行度

5. 下列公差带形状相同的有______。

A. 轴线对轴线的平行度与面对面的平行度

B. 径向圆跳动与圆度

C. 同轴度与径向全跳动

D. 轴线对面的垂直度与轴线对面的倾斜度

E. 轴线的直线度与导轨的直线度

四、改正图4-35中各项几何公差标注上的错误（不得改变原几何公差项目）。

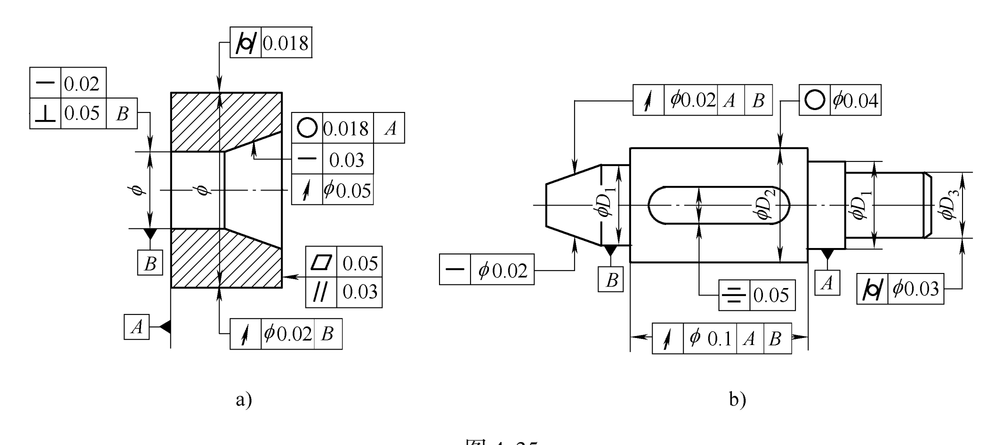


图4-35

五、试将下列技术要求标注在图4-36上。

1）圆锥面 a 的圆度公差为0.1mm。

2）圆锥面 a 对孔轴线 b 的斜向圆跳动公差为0.02mm。

3）基准孔轴线 b 的直线度公差为0.005mm。

4）孔表面 c 的圆柱度公差为 0.01mm。

5）端面 d 对基准孔轴线 b 的端面全跳动公差为 0.01mm。

6）端面 e 对端面 d 的平行度公差为 0.03mm。

六、试将下列技术要求标注在图 4-37 上。

1）ϕ30K7 和 ϕ50M7 采用包容要求。

2）底面 F 的平面度公差为 0.02mm；ϕ30K7 孔和 ϕ50M7 孔的内端面对它们的公共轴线的圆跳动公差为 0.04 mm。

3）ϕ30K7 孔和 ϕ50M7 孔对它们的公共轴线的同轴度公差为 0.03mm。

4）6×ϕ11H10 对 ϕ50M7 孔的轴线和 F 面的位置度公差为 0.05mm，基准要素的尺寸和被测要素的位置度公差应用最大实体要求。

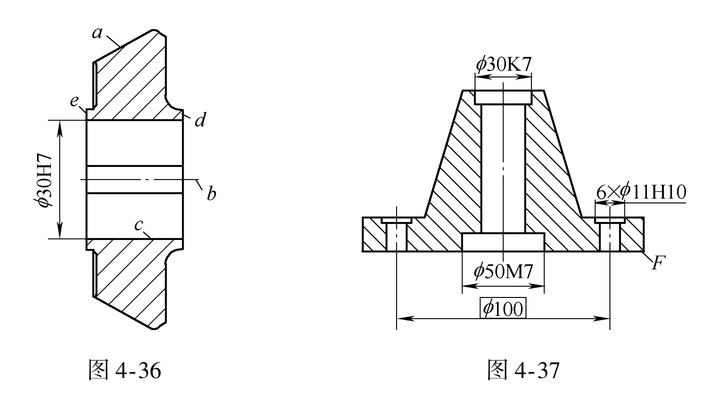
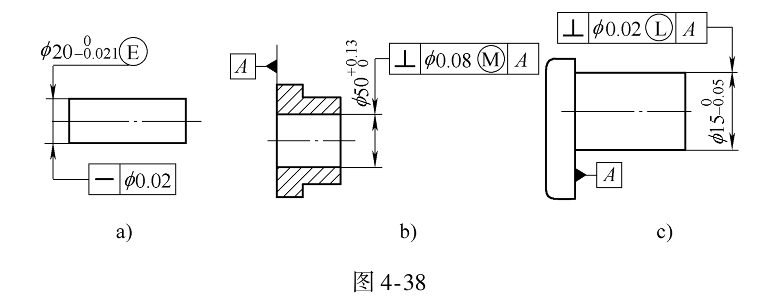


图 4-36　　图 4-37

七、根据图 4-38 中的几何公差要求填写下表。



a)　　b)　　c)

图 4-38

公差原则	采用的公差原则	边界名称及边界尺寸/mm	MMC 时的几何公差值/mm	LMC 时的几何公差值/mm	尺寸与几何精度合格条件
a					
b					
c					

第5章　表面粗糙度

表面粗糙度是指加工表面所具有的较小间距和微小峰谷所组成的一种微观几何形状特征。这种微观几何形状误差主要是表面在机械加工过程中，由刀具切削后留下的刀痕、刀具与加工表面之间的摩擦、切削层材料与工件材料分离时的撕裂、工艺系统的高频振动、变形等因素所产生的。

与表面的形状误差相比，表面粗糙度数值很小，但其对零件的使用性能和使用寿命依然会产生很大的影响。表面粗糙度对零件使用性能的主要影响包括以下几个方面：

（1）影响耐磨性　表面粗糙度数值越大，表面越粗糙，摩擦系数就越大，会使相对运动阻力增大，加剧表面磨损；如果表面粗糙度数值很小，表面过于光滑，由于分子之间的吸附作用，此时，若润滑效果不好，也会使摩擦阻力增大，同样加剧表面磨损。

（2）影响配合性质的稳定性　对间隙配合，初期磨损会使配合表面的配合间隙迅速发生变化；对过盈配合，装配时会因为表面之间的作用力将微观凸峰挤平，使实际过盈下降，降低连接强度和连接的可靠性；对过渡配合，也会因为装配或维修拆卸使配合变松，影响定位精度。

（3）影响疲劳强度　粗糙的零件表面，在交变应力作用下，对应力集中很敏感，使疲劳强度降低。

（4）影响耐蚀性　表面粗糙度数值大，易使腐蚀性物质附着于表面的微观凹谷中，并渗入金属内层，造成表面锈蚀，耐蚀性下降。

表面粗糙度还对表面的接触刚度、密封性、产品外观及表面反射能力等都有密切的关系，为保证机械零件的使用性能，应合理规定表面粗糙度的要求。我国现在实施的国家标准包括：GB/T 3505—2009《产品几何技术规范（GPS）　表面结构　轮廓法　术语、定义及表面结构参数》，GB/T 1031—2009《产品几何技术规范（GPS）　表面结构　轮廓法　表面粗糙度参数及其数值》，GB/T 131—2006《产品几何技术规范（GPS）　技术产品文件中表面结构的表示法》。

5.1　表面粗糙度的术语及定义

将加工完成的表面充分放大，就会看到实际表面的微观几何形状误差（见

图 5-1）。

（1）表面轮廓　一个指定平面与实际表面相交所得的轮廓（见图 5-1）。

测量表面粗糙度时，这个指定平面通常是采用一条名义上与实际表面平行，并在一个适当方向上的法线来选择的一个平面。从图中可知，该平面与实际表面垂直，且应当使测得的表面粗糙度数值最大。

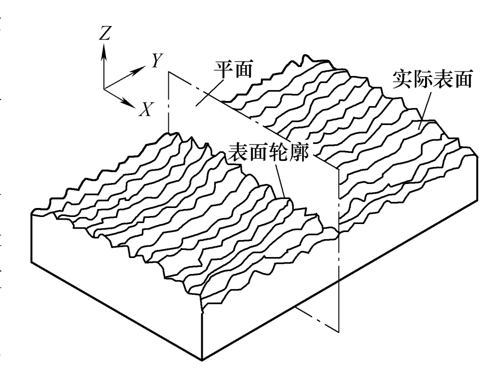


图 5-1　表面轮廓

因表面轮廓是一个含有不同波长的轮廓曲线，为测量表面参数，需要对轮廓曲线进行滤波处理。

（2）轮廓滤波器　把轮廓分成长波和短波成分的滤波器。在测量粗糙度、波纹度和原始轮廓的仪器中使用三种滤波器（见图 5-2）。它们都具有 GB/T 18777—2009 中规定的相同的传输特性，只是截止波长不同。

a）λ_s 轮廓滤波器。确定存在于表面上的粗糙度与比它更短的波的成分之间相交界限的滤波器，即粗糙度与比它更短的波的成分之间相交界限的滤波器。

b）λ_c 轮廓滤波器。确定粗糙度与波纹度成分之间相交界限的滤波器。

c）λ_f 轮廓滤波器。确定存在于表面上的波纹度与比它更长的波的成分之间相交界限的滤波器。即波长大于 λ_c 的那些轮廓波，不属于粗糙度而属于波纹度。

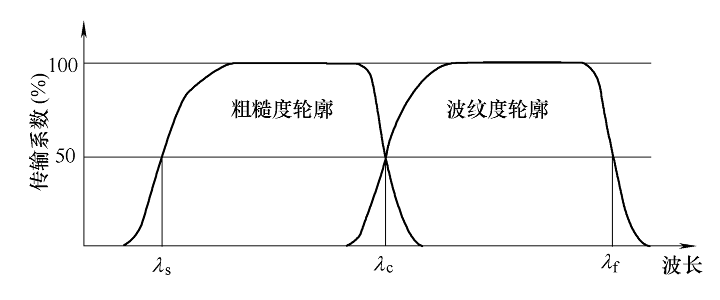


图 5-2　粗糙度和波纹度轮廓的传输特性

（3）原始轮廓　它是在应用短波长滤波器 λ_s 之后的总的轮廓，是评定原始轮廓参数的基础。

（4）粗糙度轮廓　粗糙度轮廓是对原始轮廓采用 λ_c 轮廓滤波器抑制长波成分以后形成的轮廓（即只含粗糙度的轮廓），是经过人为修正的轮廓（见图 5-2）。

粗糙度轮廓的传输频带是由 λ_s 和 λ_c 轮廓滤波器来限定的，它是评定粗糙度轮廓参数的基础。

（5）坐标系　定义表面结构参数的坐标体系。通常采用一个直角坐标系，其

轴线形成一个右手笛卡儿坐标系。X 轴与中线方向一致；Y 轴与 X 轴保持垂直，Y 轴处于实际表面中，名义上与实际表面平行；而 Z 轴则在从材料到周围介质的外延方向上（见图 5-1）。

（6）粗糙度轮廓中线　中线是具有几何轮廓形状并划分轮廓的基准线。粗糙度轮廓中线是指用 λ_c 轮廓滤波器所抑制的长波轮廓成分对应的中线，该中线按最小二乘法拟合来确定。最小二乘法就是让粗糙度轮廓上的点到中线的距离 $Z(x_i)$ 的平方和为最小（见图 5-3），即 $\sum_{i=1}^{n} Z(x_i)^2 = \min$。

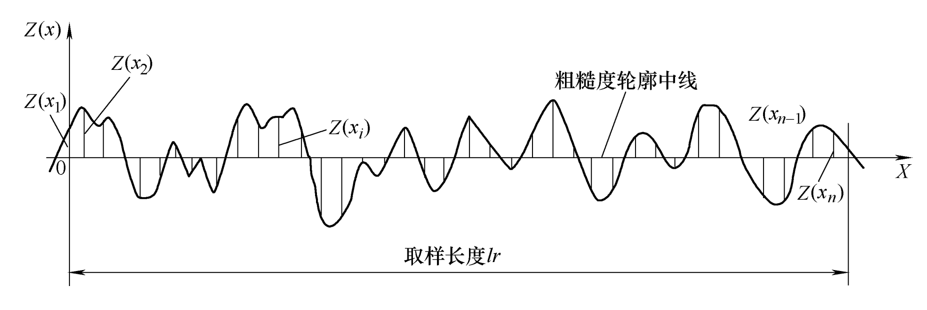


图 5-3　粗糙度轮廓中线

（7）轮廓峰与轮廓谷　轮廓峰是指被评定轮廓上连接轮廓与 X 轴两相邻交点的向外（从材料到周围介质）的轮廓部分。

轮廓谷是指被评定轮廓上连接轮廓与 X 轴两相邻交点的向内（从周围介质到材料）的轮廓部分。

（8）取样长度 lr　在 X 轴方向判别被评定轮廓不规则特征的长度。评定粗糙度轮廓的取样长度 lr 在数值上与 λ_c 轮廓滤波器的截止波长相等。

（9）评定长度 ln　用于评定被评定轮廓的 X 轴方向上的长度。由于表面粗糙度在被评定的表面上是不规则的，为使其评定更为合理，评定长度应包含一个或几个取样长度（一般包含 5 个取样长度）。

5.2　表面粗糙度的评定

为了满足对零件表面不同功能要求，国家标准（GB/T 3505—2009）规定的评定表面粗糙度的参数有幅度参数、间距参数、混合参数、曲线参数和相关参数等。下面介绍其中几种常用的评定参数。

（1）轮廓的算术平均偏差 Ra　Ra 是指在一个取样长度内纵坐标值 $Z(x)$ 绝对值的算术平均值（见图 5-4）。

$$Ra = \frac{1}{lr}\int_0^{lr} |Z(x)| \mathrm{d}x \tag{5-1}$$

或

$$Ra \approx \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |Z(x_i)| \tag{5-2}$$

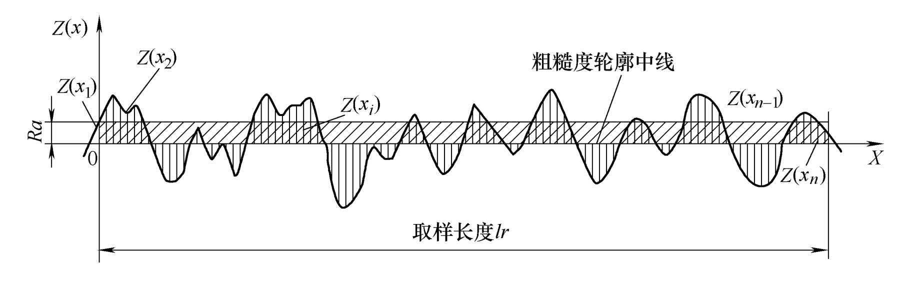


图 5-4 轮廓算术平均偏差 *Ra*

（2）轮廓的最大高度 *Rz* 它是指在一个取样长度内最大轮廓峰高 *Zp* 与轮廓谷深 *Zv* 之和（见图 5-5），即

$$Rz = Zp + Zv \tag{5-3}$$

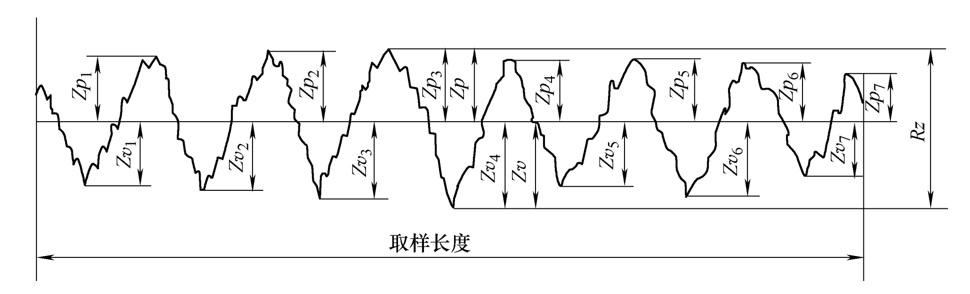


图 5-5 轮廓的最大高度 *Rz*

需要注意的是在 GB/T 3505—1983 中，*Rz* 符号曾用于表示“微观不平度的十点高度”，在使用中的一些表面粗糙度测量仪器大多测量的是 GB/T 3505—1983（旧标准）规定的 *Rz* 参数。因此，当使用现行的技术文件和图样时必须注意这一点，因为用不同类型的仪器按不同的定义计算所得到的结果，其差别并不都是非常微小而可忽略。旧标准（GB/T 3505—1983）中“微观不平度的十点高度”的计算公式为

$$Rz = \frac{\sum_{i=1}^{5} Zp_i + \sum_{i=1}^{5} Zv_i}{5} \quad \text{（微观不平度的十点高度）}$$

（3）轮廓单元的平均宽度 *Rsm* 在一个取样长度内轮廓单元宽度 *Xs* 的平均值，如图 5-6 所示。

$$Rsm = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} Xs_i \tag{5-4}$$

在计算参数 Rsm 时，需要判断轮廓单元的高度和间距。若无特殊规定，默认的高度分辨力应分别按 Rz 的 10% 选取，默认的水平间距分辨力应按取样长度的 1% 选取，上述两个条件都应满足。

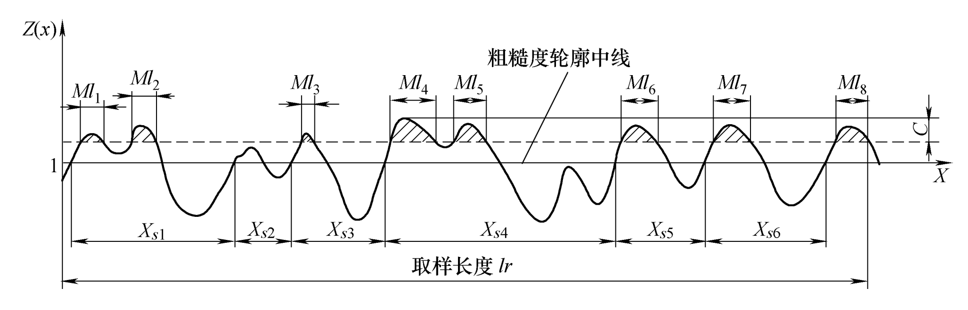


图 5-6　轮廓的平均宽度 Rsm 与支承长度率 Rmr（c）

（4）轮廓支承长度率 Rmr（c）　在给定水平截面高度 c 上轮廓的实体材料长度 Ml（c）与评定长度的比率。

$$Rmr(c) = \frac{Ml(c)}{l_n} = \frac{Ml_1 + Ml_2 + \cdots + Ml_m}{l_n} \tag{5-5}$$

轮廓的实体材料长度 Ml（c）是指在一给定水平截面高度 c 上用一平行于 X 轴的线与轮廓单元相截所得的各段截线长度之和（见图 5-6）。

轮廓支承长度率 Rmr（c）与表面轮廓形状有关，是反映表面耐磨性能的指标。显然，轮廓支承长度率的大小也与水平截距 c 的大小有关。在水平截面高度 c 相同的情况下，表面实体材料长度大，其表面更耐磨。

5.3　表面粗糙度的选择

正确选择零件表面粗糙度参数和数值，对改善机器和仪表的工作性能及提高其使用寿命意义重大。表面粗糙度的选用包括评定参数的选用和评定参数值的选用。

（1）表面粗糙度评定参数的选用　表面粗糙度评定参数的选择应根据零件的工作条件、使用性能、检测的方便性及工艺的经济性等来选择。国家标准规定，轮廓的幅度参数（Ra 或 Rz）是必须标注的参数，一般情况下选择 Ra 或 Rz 就可以满足要求。只有对少数有特殊要求的零件表面，如对涂镀性、耐蚀性、密封性等有要求时，需加选 Rsm 来控制间距的细密度；对表面的支承刚度和耐磨性有较高的要求时，应加选 Rmr（c）来控制表面的形状特征。

由于 Ra 比 Rz 更能充分反映零件表面微观几何形状特征，而且测量方便，在幅

度参数常用的参数值范围内（$Ra=0.025\sim6.3\mu m$，$Rz=0.1\sim25\mu m$），国家标准推荐优先选用 Ra。只有在表面不允许有较深加工痕迹（防止应力集中）的零件或测量长度较小（如刀尖、刀具的刃部等）的表面，才选用 Rz。

（2）表面粗糙度评定参数值的选用　由于零件的材料和功能要求不同，对每个零件表面的粗糙度要求也不同，因此应合理选用每个零件表面的粗糙度评定参数值。

表面粗糙度评定参数值的选用原则是：在满足功能要求的前提下，尽量选用较大的表面粗糙度数值（除 $Rmr(c)$ 外）。这样既满足了产品表面的使用性能要求，又能兼顾到表面的加工制造成本，提高产品的经济性。一般来说，选用的参数值高于或低于合理数值范围，都会影响零件的性能和使用寿命。在具体设计中，通常参考经验统计资料，用类比法来选择，再对比相应的工作条件进行适当的调整，并考虑以下因素：

1）同一零件上工作面的粗糙度参数值应小于非工作面的粗糙度参数值。

2）摩擦表面的粗糙度参数值应小于非摩擦表面，滚动摩擦表面比滑动摩擦表面的粗糙度参数值要小。

3）运动精度要求高、受循环载荷的表面以及易引起应力集中的部位（如圆角、沟槽等），应选取较小的粗糙度参数值。

4）配合性质要求高的结合面，配合间隙小的配合面及要求连接可靠、受重载的过盈面，应选取较小的粗糙度参数值。

5）配合性质相同和公差等级相同的零件，公称尺寸越小则表面粗糙度数值应越小，轴的数值应小于孔的数值。

6）有耐蚀性和密封性能要求的表面，粗糙度参数值应小。

7）有美观性要求的外表面，如操作手柄、食品用具等，为保证外观光滑、亮洁，也应选取较小的粗糙度参数值。

8）与标准件配合的表面，或已有专门标准对表面粗糙度做出具体要求的表面，应按相应标准的推荐（或规定）选用表面粗糙度参数值。

9）零件表面的加工精度（主要是指尺寸加工精度与形状加工精度）要求越高，其表面的粗糙度参数值越小。表面粗糙度参数值应与尺寸公差、形状公差相协调（见表 5-1）。

表 5-1　轮廓的算术平均偏差 Ra 与尺寸公差 T、形状公差 t 的一般关系

形状公差 t 与尺寸公差 T 之比（%）	表面粗糙度 Ra 与尺寸公差 T 之比（%）
约 60	≥5
约 40	≥2.5
约 25	≥1.2

轮廓的算术平均偏差 Ra 的数值规定于表 5-2，轮廓的最大高度 Rz 的数值规定于表 5-3。

附加的评定参数轮廓单元的平均宽度 *Rsm* 的数值规定于表5-4，轮廓的支承长度率 *Rmr*（*c*）的数值规定于表5-5。

表5-2 轮廓的算术平均偏差 *Ra* 的数值 （单位：μm）

Ra	0.012 0.025 0.05 0.1	0.2 0.4 0.8 1.6	3.2 6.3 12.5 25	50 100

表5-3 轮廓的最大高度 *Rz* 的数值 （单位：μm）

Rz	0.025 0.05 0.1 0.2	0.4 0.8 1.6 3.2	6.3 12.5 25 50	100 200 400 800	1600

表5-4 轮廓单元的平均宽度的数值 （单位：mm）

Rsm	0.006 0.0125 0.025 0.05	0.1 0.2 0.4 0.8	1.6 3.2 6.3 12.5

表5-5 轮廓的支承长度率 *Rmr*（*c*）的数值

Rmr（*c*）	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90

选用轮廓的支承长度率参数时，应同时给出轮廓截面高度 *c* 值，它可用微米或 *Rz* 的百分数表示。*Rz* 的百分数系列如下：5%、10%、15%、20%、25%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%。

取样长度（*lr*）的数值从表5-6给出的系列中选取。一般情况下，在测量 *Ra*、*Rz* 时，推荐按表5-6和表5-7选用对应的取样长度，此时取样长度值的标注在图样上或技术文件中可省略。当有特殊要求时，应给出相应的取样长度值，并在图样上或技术文件中注出。

表5-6 取样长度（*lr*）的数值 （单位：mm）

lr	0.08	0.25	0.8	2.5	8	25

表5-7 *Ra* 参数值与取样长度 *lr* 值的对应关系

Ra/μm	*lr*/mm	*ln*/mm（*ln*=5*lr*）
≥0.008~0.02	0.08	0.4
>0.02~0.1	0.25	1.25
>0.1~2.0	0.8	4.0
>2.0~10.0	2.5	12.5
>10.0~80.0	8.0	40.0

对于微观不平度间距较大的端铣、滚铣及其他大进给走刀量的加工表面，应按标准中规定的取样长度系列选取较大的取样长度值。

由于加工表面不均匀，在评定表面粗糙度时，其评定长度应根据不同的加工方法和相应的取样长度来确定。一般情况下，当测量 Ra 和 Rz 时，推荐按表 5-7 和表 5-8 选取相应的评定长度。如被测表面均匀性较好，测量时可选用小于 $5lr$ 的评定长度值；均匀性较差的表面可选用大于 $5lr$ 的评定长度。

表 5-8　Rz 参数数值与取样长度 lr 值的对应关系

Rz/μm	lr/mm	ln/mm（$ln=5lr$）
≥0.025~0.1	0.08	0.4
>0.1~0.5	0.25	1.25
>0.5~10.0	0.8	4.0
>10.0~50	2.5	12.5
>50~320	8.0	40.0

在规定表面粗糙度要求时，应给出表面粗糙度参数值和测定时的取样长度值两项基本要求。必要时也可规定表面加工纹理、加工方法或加工顺序和不同区域的粗糙度等附加要求。

为保证制品表面质量，可按功能需要规定表面粗糙度参数值。否则，可不规定其参数值，也不需要检查。

对表面粗糙度的要求不适用于表面缺陷。在评定过程中，不应把表面缺陷（如沟槽、气孔、划痕等）包含进去。必要时，应单独规定对表面缺陷的要求。

根据表面功能和生产的经济合理性，当选用标准中系列值不能满足要求时，可选取补充系列值。

5.4　表面粗糙度的标注

表面粗糙度的标注方法应符合国家标准 GB/T 131—2006《产品几何技术规范（GPS）　技术产品文件中表面结构的表示法》的规定，默认评定长度值应符合 GB/T 10610的规定。

5.4.1　表面粗糙度的符号

表面粗糙度的符号包括基本图形符号与扩展图形符号。

表面粗糙度的基本图形符号由两条不等长的与标注表面成 60°夹角的直线构成，如图 5-7a 所示。基本图形符号仅用于简化代号标注（见图 5-7a），没有补充说明时不能单独使用。

扩展图形符号有两种，图 5-7b 表示指定的表面是用去除材料的方法获得，如通过机械加工获得的表面。图 5-7c 表示指定的表面是用不去除材料的方法获得。

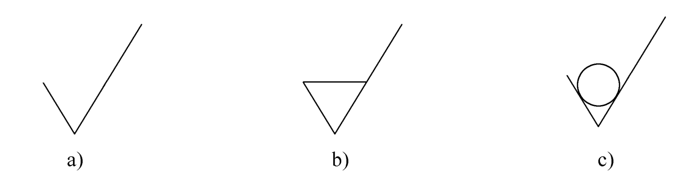


图 5-7　表面粗糙度的图形符号

a）基本图形符号　b）去除材料的扩展图形符号　c）不去除材料的扩展图形符号

当要求标注表面结构特征的补充信息时，应使用表面粗糙度的完整图形符号（见图 5-8）。

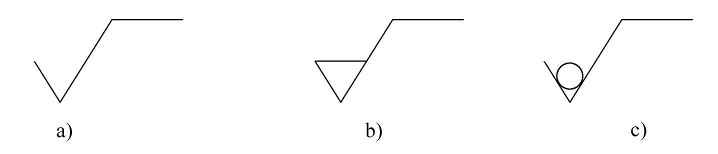


图 5-8　表面粗糙度的完整图形符号

a）允许任何工艺　b）去除材料　c）不去除材料

标注表面粗糙度时，为了明确表面结构要求，除了标注表面粗糙度参数和数值外，必要时还应当标注补充要求。补充要求包括传输带、取样长度、加工方法、表面纹理及方向、加工余量等。

在完整图形符号中，表面粗糙度的单一要求和补充要求应注写在表 5-9 所示的指定位置上，补充要求可根据需要标注。

表 5-9　表面粗糙度参数和数值的注写位置

表面粗糙度的图形符号	表面粗糙度参数和数值的各种注写位置说明
c a b e　d	位置 a：注写表面粗糙度的单一要求，单位为 μm
	位置 a 和 b：注写两个或多个粗糙度要求。如果要注写第三个或更多个表面结构要求，图形符号应在垂直方向扩大，以空出足够的空间。扩大图形符号时，a 和 b 的位置随之上移
	位置 c：注写加工方法、表面处理、涂层或其他加工工艺要求等，如车、磨、镀等加工表面
	位置 d：注写表面纹理和方向，如“＝”、“X”等（见表 5-10）
	位置 e：注写加工余量，以 mm 为单位给出数值

表 5-10 表面纹理符号和标注解释

符号	示例	解释	符号	示例	解释
=		纹理平行于视图所在的投影面	C		纹理呈近似同心圆且圆心与表面中心相关
⊥		纹理垂直于视图所在的投影面	R		纹理呈近似放射状且与表面圆心相关
X		纹理呈两斜向交叉且与视图所在的投影面相交	P		纹理呈微粒、凸起，无方向
M		纹理呈多方向			

在位置 a 标注表面粗糙度的第一要求，是不能省略的。它包含了表面粗糙度参数代号、极限值、传输带或取样长度。标注的顺序为：上限或下限符号、传输带或取样长度、参数代号、评定长度和极限值。为避免误解，在参数代号和极限值间应插入空格。传输带或取样长度后应有一斜线“/”，之后是表面粗糙度参数代号，最后是数值（见图 5-9）。

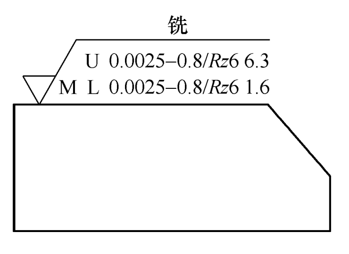


图 5-9 粗糙度注写顺序

上限或下限符号的标注在完整符号中表示双向极限时应标注极限代号。上限值在上方，用 U 表示；下限值在下方，用 L 表示（见图 5-9）。如果同一参数有双向极限要求，在不引起歧义时，可不加注“U”和“L”。当只有单向极限要求时，如果是单向上限值，则可不加注“U”，若为单向下限值，应加注“L”。

当在图样某个视图上构成封闭轮廓的各表面有相同的表面粗糙度要求时，应在完整图形符号上加一圆圈，标注在图样中工件的封闭轮廓线上，如图 5-10 所示。如果标注会引起歧义，各表面应分别标注。

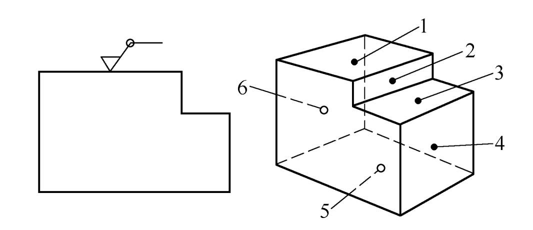


图 5-10 对周边各面有相同的表面粗糙度要求的标注方法

注：图示标注表示图形中封闭轮廓的六个面有共同要求（不包括前后面）。

5.4.2 表面粗糙度符号、代号的标注位置与方向

根据 GB/T 4458.4 的规定，表面粗糙度符号、代号的注写和读取方向与尺寸的注写和读取一致（见图 5-11）。

表面粗糙度要求可以标注在轮廓线上、轮廓线的延长线、指引线、尺寸线或几何公差框格的上方。当粗糙度要求标注在轮廓线上时，其符号应从材料外指向并接触表面。必要时，表面结构符号也可用带箭头或黑点的指引线引出标注（见图 5-12 ~ 图 5-16）。

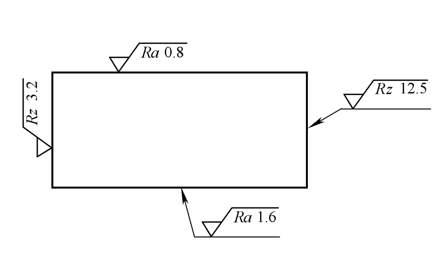


图 5-11 表面粗糙度的注写方向

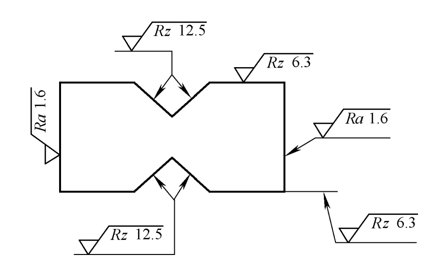


图 5-12 表面粗糙度要求在轮廓线上的标注

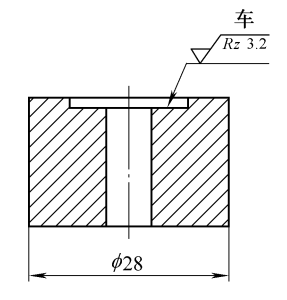


图 5-13 用指引线引出标注表面粗糙度要求

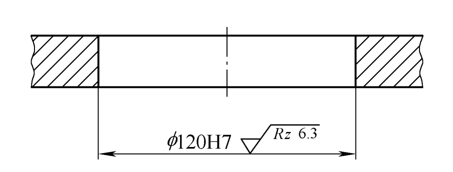


图 5-14 表面粗糙度要求标注在尺寸线上

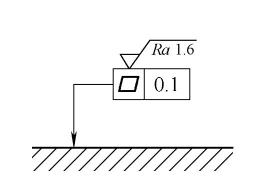


图5-15　表面粗糙度要求标注在几何公差框格的上方

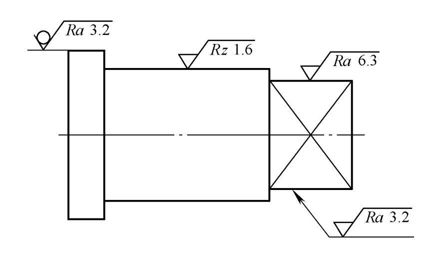


图5-16　圆柱和棱柱的表面粗糙度要求的注法

5.4.3　表面粗糙度要求的简化标注

（1）有相同表面粗糙度要求的简化注法　如果在工件的多数（包括全部）表面有相同的表面粗糙度要求，则其表面粗糙度要求可统一标注在图样的标题栏附近。此时（除全部表面有相同要求的情况外），表面粗糙度要求的符号后面应有：

——在圆括号内给出无任何其他标注的基本符号（见图5-17a）；

——在圆括号内给出不同的表面结构要求（见图5-17b）。

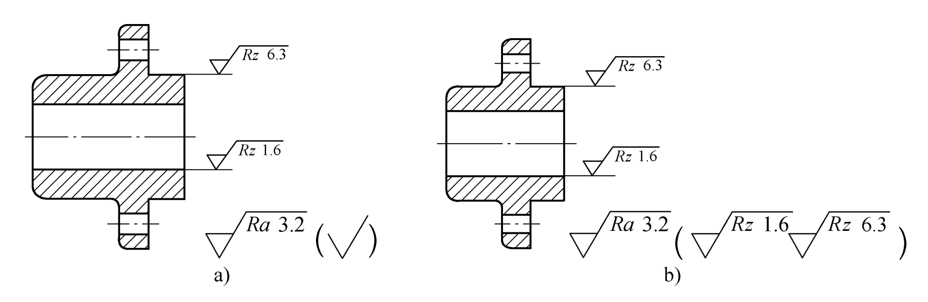


图5-17　大多数表面有相同的粗糙度要求的简化注法

（2）用结构符号或用带字母的完整符号的简化注法　当多个表面具有相同粗糙度要求或图纸空间有限时，可以用表面粗糙度符号或用带字母的完整符号（见表5-11），以等式的形式，在图形或标题栏附近，对有相同粗糙度要求的多个表面进行简化标注（见图5-18）。

表5-11　粗糙度代号解释

符　　号	含义/解释
Rz 0.4	表示不允许去除材料，单向上限值，默认传输带，*R*轮廓，粗糙度的最大高度0.4μm，评定长度为5个取样长度（默认），“16%规则”（默认）
Rzmax 0.2	表示去除材料，单向上限值，默认传输带，*R*轮廓，粗糙度最大高度的最大值0.2μm；评定长度为5个取样长度（默认），“最大规则”
0.008–0.8/Ra 3.2	表示去除材料，单向上限值，传输带0.008～0.8mm，*R*轮廓，算术平均偏差3.2μm，评定长度为5个取样长度（默认），“16%规则”（默认）
U Ramax 3.2 L Ra 0.8	表示不允许去除材料，双向极限值，两极限值均使用默认传输带，*R*轮廓，上限值：算术平均偏差3.2μm，评定长度为5个取样长度（默认），“最大规则”；下限值：算术平均偏差0.8μm。评定长度为5个取样长度（默认），“16%规则”（默认）

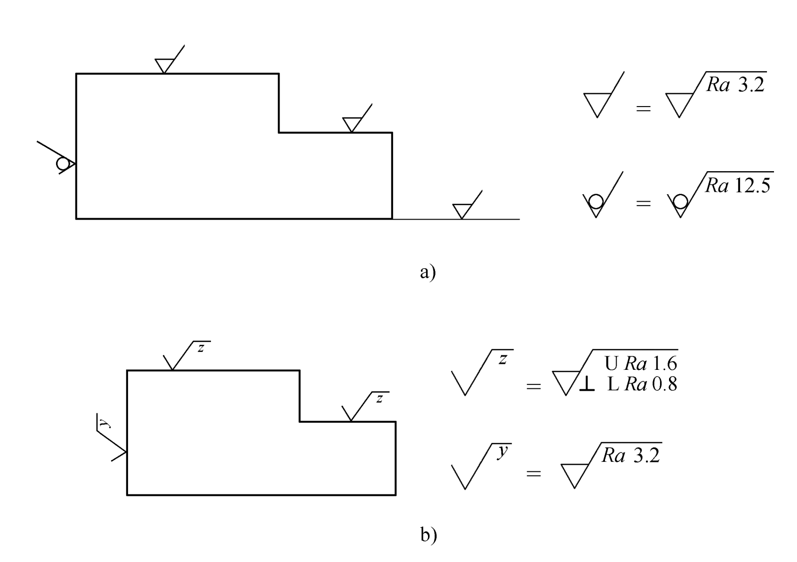


图 5-18 用结构符号或用带字母的完整符号的简化注法
a）用结构符号的简化注法 b）用带字母的完整符号的简化注法

5.4.4 新旧表面粗糙度要求的图形标注对比

新国标 GB/T 131—2006 中，表面粗糙度要求的图形标注方法，相对于旧国标出现了一些明显的变化，现实生产中所使用的图样还存在大量的旧国标的图形标注的情况。为了便于应用和对比，在表 5-12 中列出表面粗糙度要求的新旧图形标注对比，供大家在使用中参考。

表 5-12 新旧表面粗糙度要求的图形标注对比

序号	GB/T 131 的版本			
	1982（第一版）	1993（第二版）	2006（第三版）	说明
1	1.6	1.6 1.6	*Ra* 1.6	*Ra* 只采用“16% 规则”
2	*Ry* 3.2	*Ry* 3.2 *Ry* 3.2	*Rz* 3.2	除了 *Ra*“16% 规则”的参数
3	—	3.2 max	*Ra*max 3.2	“最大规则”
4	1.6/0.8	1.6/0.8	−0.8/*Ra* 1.6	*Ra* 加取样长度
5	—	—	0.025−0.8/*Ra* 1.6	传输带
6	*Ry* 3.2/0.8	*Ry* 3.2/0.8	−0.8/*Rz* 3.2	除 *Ra* 外，其他参数及取样长度

（续）

序号	GB/T 131 的版本			
	1982（第一版）	1993（第二版）	2006（第三版）	说明
7	1.6 *Ry* 6.3	1.6 *Ry* 6.3	*Ra* 1.6 *Ra* 3.2	*Ra* 及其他参数
8	—	—	L *Ra* 1.6	下限值
9	3.2 1.6	3.2 1.6	U *Ra* 3.2 L *Ra* 1.6　*Ra* 3.2 *Ra* 1.6	上限值与下限值
10	—	*Ry* 3.2	*Rz*3 3.2	评定长度中的取样长度个数如果不是 5 个

5.5　表面粗糙度的检测

表面粗糙度各参数的数值应在垂直于基准面的各截面上获得。对给定的表面，如截面方向与高度参数（*Ra*、*Rz*）最大值的方向一致时，则可不规定测量截面的方向，否则应在图样上标出。表面粗糙度的检测常用方法有以下四种：

（1）比较法　比较法是指将被测表面与粗糙度样块进行比较来评定表面粗糙度。可通过目测直接判断或借助放大镜、显微镜进行目测，甚至可用手摸、指甲划过的感觉来判定被测表面的粗糙度。

比较法精度较差，一般仅适用于车间检验一些表面粗糙度参数值较大的工件。检测时，要尽可能使表面粗糙度样板的材料、形状和加工方法及加工纹理与被测工件相同，从而减小误差，提高判定的准确性。

（2）光切法　光切法是利用光切原理来测量表面粗糙度的方法。常用光切显微镜（双管显微镜）测量 *Rz*（旧国标的 *Ry*）和旧国标的微观不平度十点高度。

（3）干涉法　干涉法是利用光波干涉原理来测量表面粗糙度的方法。通常用干涉显微镜测量极光滑的表面，其测量范围一般为 0.025 ~ 0.8μm。

（4）针描法　针描法指通过触针与被测表面接触来测量表面粗糙度的方法。针描法所用的测量仪器是电动轮廓仪，可以测量 *Ra* = 0.025 ~ 5μm 的表面。测量工件表面粗糙度时，将传感器放在工件被测表面上，由驱动机构带动传感器沿被测表面进行匀速移动，被测表面的粗糙度引起触针产生位移，该位移使传感器电感线圈的电感量发生变化，测量电桥的输出电压产生相应的变化，从而得到测量表面粗糙度的电信号，该信号经过放大、滤波、A/D 转换等处理，输入计算机进行数字滤波和参数计算，最后显示或输出粗糙度的多项参数的测量结果。

针描法的测量精度、测量效率均较高，对表面粗糙度的评价全面。

自测习题五

1. 表面粗糙度的含义是什么？对零件的使用性能有哪些影响？

2. 表面粗糙度的主要评定参数有哪些？应优先采用哪个参数？

3. 选择表面粗糙度参数值时应考虑哪些因素？

4. 将下列表面粗糙度要求标注在图 5-19 上，各加工面均采用去除材料的方法获得。

1）ϕ40mm 的圆柱外表面的粗糙度 Ra 的允许值为 1.6μm，Rz 的允许值为 6.3μm。

2）ϕ55mm 的圆柱外表面的粗糙度 Ra 单向上限值为 3.2μm，传输带0.004 ~ 0.8mm。

3）ϕ26mm 的内孔表面采用磨削方法加工，Ra 单向上限值为 3.2μm。评定长度为 3 个取样长度。

4）其余各加工表面的表面粗糙度 Ra 单向上限值为 12.5μm。

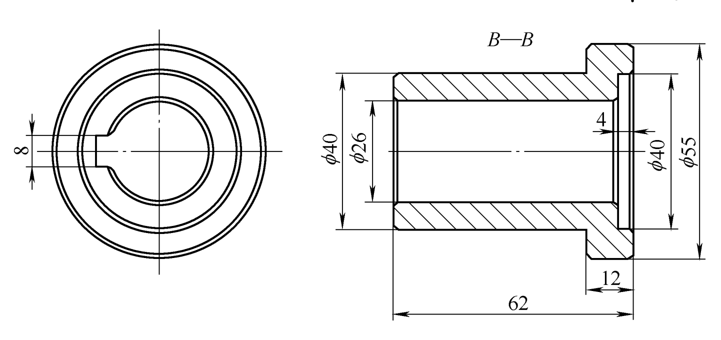


图 5-19

第6章 光滑工件尺寸的检测与光滑极限量规设计

6.1 概述

在机械制造中，工件尺寸的检测可使用通用计量器具或光滑极限量规。通用计量器具是有刻线的量具，如游标卡尺、千分尺、百分表、千分表及比较仪等；光滑极限量规是没有刻线的专用测量工具，由成对使用的通规、止规和连接手柄等组成，用量规检验工件时虽然不能测量出工件的实际尺寸，但能判断工件是否合格。由于量规结构简单，使用方便、可靠，检验效率高，适合在大批量生产中，定性地判明所检测的孔或轴是否合格。

为了确保产品质量，提高产品的信誉和竞争力，工件尺寸的新国家标准采用了“内缩方式”确定验收界限。验收原则是所用验收方法应只接收位于规定的尺寸极限之内的工件。下面分别介绍“光滑工件尺寸的检验”（GB/T 3177—2009）和“光滑极限量规”（GB/T 1957—2006）这两个标准的主要内容。

6.2 光滑工件尺寸的检测

GB/T 3177—2009《产品几何技术规范（GPS） 光滑工件尺寸的检验》适用于使用通用计量器具，如游标卡尺、千分尺及车间使用的比较仪、投影仪等量具量仪，对图样上注出的公差等级为6级～18级（IT6～IT18）、公称尺寸至500mm的光滑工件尺寸的检验，也适用于对一般公差尺寸的检验。

6.2.1 光滑工件尺寸检验的验收原则与验收极限

光滑工件尺寸检验的验收原则是所用验收方法应只接收位于规定的尺寸极限之内的工件。

由于计量器具和计量系统都存在内在误差，故任何测量都不能测出真值。在车间实际检测情况下，工件合格与否，只按一次测量来判断。工件的形状误差、温度、压陷效应等对测量结果的影响，以及计量器具和标准器的系统误差均不进行修正。因此，任何检验都可能存在误判，规定的验收极限应保证验收质量。

验收极限是判断所检验工件尺寸合格与否的尺寸界限。标准规定了“内缩方

式”和“不内缩方式”两种验收极限。

（1）内缩方式　内缩方式的验收极限是从规定的最大实体尺寸（MMS）和最小实体尺寸（LMS）分别向工件公差带内移动一个安全裕度（A）来确定的（见图6-1）。A 值按工件公差（T）的1/10确定，其数值在表6-1中给出。

孔尺寸的验收极限：

$$\begin{aligned}\text{上验收极限} &= \text{最小实体尺寸(LMS)} - \text{安全裕度}(A)\\ &= \text{上极限尺寸}(D_{max}) - \text{安全裕度}(A)\\ \text{下验收极限} &= \text{最大实体尺寸(MMS)} + \text{安全裕度}(A)\\ &= \text{下极限尺寸}(D_{min}) + \text{安全裕度}(A)\end{aligned}$$

轴尺寸的验收极限：

$$\begin{aligned}\text{上验收极限} &= \text{最大实体尺寸(MMS)} - \text{安全裕度}(A)\\ &= \text{上极限尺寸}(d_{max}) - \text{安全裕度}(A)\\ \text{下验收极限} &= \text{最小实体尺寸(LMS)} + \text{安全裕度}(A)\\ &= \text{下极限尺寸}(d_{min}) + \text{安全裕度}(A)\end{aligned}$$

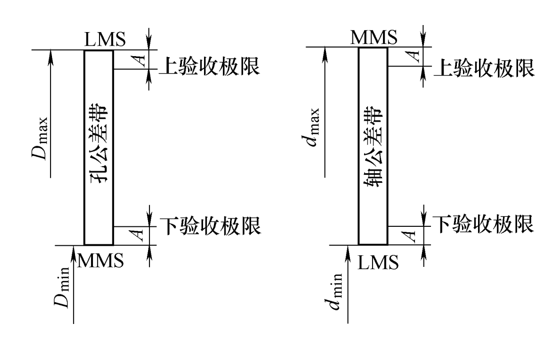


图6-1　内缩方式的验收极限

（2）不内缩方式　不内缩方式验收极限等于规定的最大实体尺寸（MMS）和最小实体尺寸（LMS），即 A 值等于零（见图6-2）。

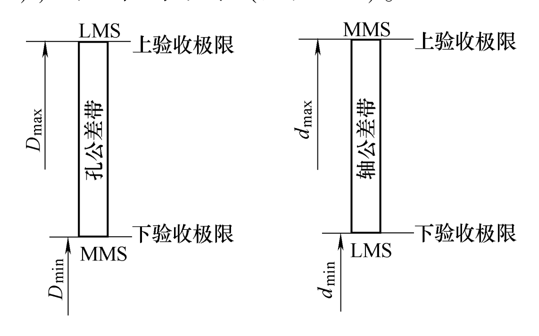


图6-2　不内缩方式的验收极限

孔尺寸的验收极限：

上验收极限 = 最小实体尺寸(LMS) = 上极限尺寸(D_{max})

下验收极限 = 最大实体尺寸(MMS) = 下极限尺寸(D_{min})

轴尺寸的验收极限:

上验收极限 = 最大实体尺寸(MMS) = 上极限尺寸(d_{max})

下验收极限 = 最小实体尺寸(LMS) = 下极限尺寸(d_{min})

验收极限方式的选择要结合尺寸功能要求及其重要程度、尺寸公差等级、测量不确定度和过程能力等因素综合考虑。

a）对遵循包容要求的尺寸、公差等级高的尺寸，其验收极限按内缩方式确定。

b）当过程能力指数 $C_p \geqslant 1$ 时（$C_p = T/6\sigma$），其验收极限可以按不内缩方式确定（见图 6-2）；但对遵循包容要求的尺寸，其最大实体尺寸一边的验收极限仍应按内缩方式确定（见图 6-3）。

c）对偏态分布的尺寸，其验收极限可以仅对尺寸偏向的一边按内缩方式确定（见图 6-4）。

d）对非配合尺寸和一般公差的尺寸，其验收极限按不内缩方式确定（见图 6-2）。

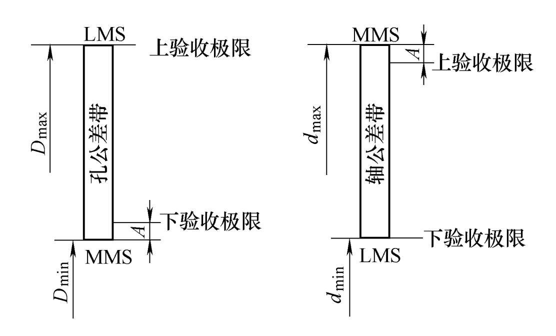


图 6-3 当尺寸遵循包容要求和 $C_p \geqslant 1$ 时的验收极限

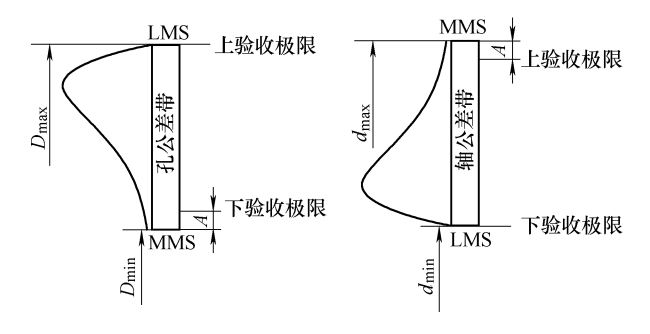


图 6-4 偏态分布的尺寸的验收极限

6.2.2 计量器具的选用原则

由于计量器具和测量系统都存在误差，任何测量方法都可能发生一定的误判概率。验收工件时发生的误判有两类：误收与误废。

误收是指把尺寸超出规定尺寸极限的工件判为合格；

误废是指把处在规定尺寸极限之内的工件判为废品。

误收影响产品质量，误废造成经济损失。验收原则规定，所用验收方法应只接收位于规定尺寸极限之内的工件，因此，测量将只允许误废，不允许误收。

在测量中，由于测量误差的存在而使测量值不能肯定的程度，用不确定度（u）来表示。测得的实际尺寸分散范围越大，即不确定度越大。安全裕度 A 是因测量不确定度的需要而设置的。

测量不确定度 u 由计量器具的不确定度 u_1 和测量条件的不确定度 u_2 两部分组成。计量器具的不确定度 u_1 是表征由计量器具内在误差所引起的测得的实际尺寸对真实尺寸可能分散的一个范围；测量条件的不确定度 u_2 是表征测量过程中，由温度、压陷效应及工件形状误差等因素，所引起的测得的实际尺寸对真实尺寸可能分散的一个范围。

u_1 与 u_2 对测量不确定度的影响程度是不同的，取 $u_1 \approx 0.9u$，$u_2 = 0.45u$，则

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}$$

标准规定按照计量器具的测量不确定度的允许值（u_1）选用计量器具。所选用的计量器具的测量不确定度数值应等于或小于选定的 u_1 值，即 $u_1 \leqslant u$。

计量器具的测量不确定度允许值（u_1）按测量不确定度（u）与工件公差的比值分档；对 IT6 ~ IT11 的分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三档；对 IT12 ~ IT18 的分为Ⅰ、Ⅱ两档。测量不确定度（u）的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三档值分别为工件公差的1/10、1/6、1/4。计量器具的测量不确定度允许值（u_1）约为测量不确定度（u）的0.9倍，其三档数值列于表6-1中。

选用表6-1中计量器具的测量不确定度允许值（u_1）时，一般情况下，优先选用Ⅰ档，其次选用Ⅱ档、Ⅲ档。表6-2、表6-3和表6-4列出了常用计量器具的测量不确定度。

【例6-1】 被测工件为 ϕ40js6Ⓔ的轴，试确定验收极限并选择合适的计量器具。

解：1）确定工件的公差与极限偏差，查表2-7和表2-9可知：

$$IT6 = 0.016\text{mm}$$
$$es = +0.008\text{mm}$$
$$ei = -0.008\text{mm}$$

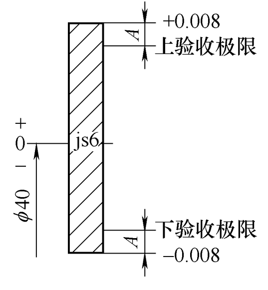


图6-5 例6-1图

表 6-1　安全裕度(A)与计量器具的测量不确定度允许值(u_1)　　　　（单位：μm）

公差等级		6					7					8					9					10					11				
公称尺寸/mm		T	A	u_1			T	A	u_1			T	A	u_1			T	A	u_1			T	A	u_1			T	A	u_1		
大于	至			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
—	3	6	0.6	0.54	0.9	1.4	10	1.0	0.9	1.5	2.3	14	1.4	1.3	2.1	3.2	25	2.5	2.3	3.8	5.6	40	4.0	3.6	6	9	60	6	5.4	9.0	14
3	6	8	0.8	0.72	1.2	1.8	12	1.2	1.1	1.8	2.7	18	1.8	1.6	2.7	4.1	30	3.0	2.7	4.5	6.8	48	4.8	4.3	7	11	75	8	6.8	11	17
6	10	9	0.9	0.81	1.4	2.0	15	1.5	1.4	2.3	3.4	22	2.2	2.0	3.3	5.0	36	3.6	3.3	5.4	8.1	58	5.8	5.2	9	13	90	9	8.1	14	20
10	18	11	1.1	1.0	1.7	2.5	18	1.8	1.7	2.7	4.1	27	2.7	2.4	4.1	6.1	43	4.3	3.9	6.5	9.7	70	7.0	6.3	11	16	110	11	10	17	25
18	30	13	1.3	1.2	2.0	2.9	21	2.1	1.9	3.2	4.7	33	3.3	3.0	5.0	7.4	52	5.2	4.7	7.8	12	84	8.4	7.6	13	19	130	13	12	20	29
30	50	16	1.6	1.4	2.4	3.6	25	2.5	2.3	3.8	5.6	39	3.9	3.5	5.9	8.8	62	6.2	5.6	9.3	14	100	10	9.0	15	23	160	16	14	24	36
50	80	19	1.9	1.7	2.9	4.3	30	3.0	2.7	4.5	6.8	46	4.6	4.1	6.9	10	74	7.4	6.7	11	17	120	12	11	18	27	190	19	17	29	43
80	120	22	2.2	2.0	3.3	5.0	35	3.5	3.2	5.3	7.9	54	5.4	4.9	8.1	12	87	8.7	7.8	13	20	140	14	13	21	32	220	22	20	33	50
120	180	25	2.5	2.3	3.8	5.6	40	4.0	3.6	6.0	9.0	63	6.3	5.7	9.5	14	100	10	9.0	15	23	160	16	15	24	36	250	25	23	38	56
180	250	29	2.9	2.6	4.4	6.5	46	4.6	4.1	6.9	10	72	7.2	6.5	11	16	115	12	10	17	26	185	18	17	28	42	290	29	26	44	65
250	315	32	3.2	2.9	4.8	7.2	52	5.2	4.7	7.8	12	81	8.1	7.3	12	18	130	13	12	19	29	210	21	19	32	47	320	32	29	48	72
315	400	36	3.6	3.2	5.4	8.1	57	5.7	5.1	8.4	13	89	8.9	8.0	13	20	140	14	13	21	32	230	23	21	35	52	360	36	32	54	81
400	500	40	4.0	3.6	6.0	9.0	63	6.3	5.7	9.5	14	97	9.7	8.7	15	22	155	16	14	23	35	250	25	23	38	56	400	40	36	60	90

（续）

公差等级		12				13				14				15				16				17				18			
公称尺寸/mm		T	A	u_1		T	A	u_1		T	A	u_1		T	A	u_1		T	A	u_1		T	A	u_1		T	A	u_1	
大于	至			Ⅰ	Ⅱ			Ⅰ	Ⅱ			Ⅰ	Ⅱ			Ⅰ	Ⅱ			Ⅰ	Ⅱ			Ⅰ	Ⅱ			Ⅰ	Ⅱ
—	3	100	10	9.0	15	140	14	13	21	250	25	23	38	400	40	36	60	600	60	54	90	1000	100	90	150	1400	140	135	210
3	6	120	12	11	18	180	18	16	27	300	30	27	45	480	48	43	72	750	75	68	110	1200	120	110	180	1800	180	160	270
6	10	150	15	14	23	220	22	20	33	360	36	32	54	580	58	52	87	900	90	81	140	1500	150	140	230	2200	220	200	330
10	18	180	18	16	27	270	27	24	41	430	43	39	65	700	70	63	110	1100	110	100	170	1800	180	160	270	2700	270	240	400
18	30	210	21	19	32	330	33	30	50	520	52	47	78	840	84	76	130	1300	130	120	200	2100	210	190	320	3300	330	300	490
30	50	250	25	23	38	390	39	35	59	620	62	56	93	1000	100	90	150	1600	160	140	240	2500	250	220	380	3900	390	350	580
50	80	300	30	27	45	460	46	41	69	740	74	67	110	1200	120	110	180	1900	190	170	290	3000	300	270	450	4600	460	410	690
80	120	350	35	32	53	540	54	49	81	870	87	78	130	1400	140	130	210	2200	220	200	330	3500	350	320	530	5400	540	480	810
120	180	400	40	36	60	630	63	57	95	1000	100	90	150	1600	160	150	240	2500	250	230	380	4000	400	360	600	6300	630	570	940
180	250	460	46	41	69	720	72	65	110	1150	115	100	170	1850	185	170	280	2900	290	260	440	4600	460	410	690	7200	720	650	1080
250	315	520	52	47	78	810	81	73	120	1300	130	120	190	2100	210	190	320	3200	320	290	480	5200	520	470	780	8100	810	730	1210
315	400	570	57	51	86	890	89	80	130	1400	140	130	210	2300	230	210	350	3600	360	320	540	5700	570	510	860	8900	890	800	1330
400	500	630	63	57	95	970	97	87	150	1500	150	140	230	2500	250	230	380	4000	400	360	600	6300	630	570	950	9700	970	870	1450

表 6-2　千分尺和游标卡尺的测量不确定度　　（单位：mm）

<table>
<tr><th colspan="2">尺寸范围</th><th colspan="4">计量器具类型</th></tr>
<tr><th>大于</th><th>至</th><th>分度值 0.01
外径千分尺</th><th>分度值 0.01
内径千分尺</th><th>分度值 0.01
游标卡尺</th><th>分度值 0.05
游标卡尺</th></tr>
<tr><td></td><td>50</td><td>0.004</td><td rowspan="3">0.008</td><td rowspan="6">0.020</td><td rowspan="4">0.050</td></tr>
<tr><td>50</td><td>100</td><td>0.005</td></tr>
<tr><td>100</td><td>150</td><td>0.006</td></tr>
<tr><td>150</td><td>200</td><td>0.007</td><td rowspan="3">0.013</td></tr>
<tr><td>200</td><td>250</td><td>0.008</td><td rowspan="8">0.100</td></tr>
<tr><td>250</td><td>300</td><td>0.009</td></tr>
<tr><td>300</td><td>350</td><td>0.010</td><td rowspan="3">0.020</td><td rowspan="7"></td></tr>
<tr><td>350</td><td>400</td><td>0.011</td></tr>
<tr><td>400</td><td>450</td><td>0.012</td></tr>
<tr><td>450</td><td>500</td><td>0.013</td><td>0.025</td></tr>
<tr><td>500</td><td>600</td><td rowspan="3"></td><td rowspan="3">0.030</td></tr>
<tr><td>600</td><td>700</td></tr>
<tr><td>700</td><td>800</td><td>0.150</td></tr>
</table>

表 6-3　指示表的测量不确定度　　（单位：mm）

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2">尺寸范围</th><th colspan="4">所使用的计量器具</th></tr>
<tr><th>分度值为 0.001 的千分表（0 级在全程范围内，1 级在 0.2mm 内）；分度值为 0.002 千分表（在 1 转范围内）</th><th>分度值为 0.001、0.002、0.005 的千分表（1 级在全程范围内）；分度值为 0.01 的百分表（0 级在任意 1mm 内）</th><th>分度值为 0.01 的百分表（0 级在全程范围内，1 级在任意 1mm 内）</th><th>分度值为 0.01 的百分表（1 级在全程范围内）</th></tr>
<tr><th>大于</th><th>至</th><th colspan="4">不确定度</th></tr>
<tr><td></td><td>115</td><td>0.005</td><td rowspan="2">0.010</td><td rowspan="2">0.018</td><td rowspan="2">0.030</td></tr>
<tr><td>115</td><td>315</td><td>0.006</td></tr>
</table>

2）确定安全裕度 A 和计量器具不确定度允许值 u_1，查表 6-1 可知：

$$A = 0.0016\text{mm},\ u_1 = 0.0014\text{mm}$$

3）确定验收极限取：

$$\text{上验收极限} = 40\text{mm} + 0.008\text{mm} - 0.0016\text{mm} = 40.0064\text{mm}$$

$$\text{下验收极限} = 40\text{mm} - 0.008\text{mm} + 0.0016\text{mm} = 39.9936\text{mm}$$

4）选择计量器具：查表6-4可知，分度值为0.001的比较仪的不确定度为0.001mm，小于允许值0.0014mm，可以满足测量的使用要求。

表6-4　比较仪的测量不确定度　　（单位：mm）

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">尺寸范围</td><td colspan="4">所使用的计量器具</td></tr>
<tr><td>分度值为0.0005（相当于放大倍数2000倍）的比较仪</td><td>分度值为0.001（相当于放大倍数1000倍）的比较仪</td><td>分度值为0.002（相当于放大倍数400倍）的比较仪</td><td>分度值为0.005（相当于放大倍数250倍）的比较仪</td></tr>
<tr><td>大于</td><td>至</td><td colspan="4">不确定度</td></tr>
<tr><td></td><td>25</td><td>0.0006</td><td rowspan="2">0.0010</td><td>0.0017</td><td rowspan="6">0.0030</td></tr>
<tr><td>25</td><td>40</td><td>0.0007</td><td rowspan="3">0.0018</td></tr>
<tr><td>40</td><td>65</td><td rowspan="2">0.0008</td><td rowspan="2">0.0011</td></tr>
<tr><td>65</td><td>90</td></tr>
<tr><td>90</td><td>115</td><td>0.0009</td><td>0.0012</td><td rowspan="2">0.0019</td></tr>
<tr><td>115</td><td>165</td><td>0.0010</td><td>0.0013</td></tr>
<tr><td>165</td><td>215</td><td>0.0012</td><td>0.0014</td><td>0.0020</td><td rowspan="3">0.0035</td></tr>
<tr><td>215</td><td>265</td><td>0.0014</td><td>0.0016</td><td>0.0021</td></tr>
<tr><td>265</td><td>315</td><td>0.0016</td><td>0.0017</td><td>0.0022</td></tr>
</table>

6.3　光滑极限量规

光滑极限量规是具有以孔或轴的上极限尺寸和下极限尺寸为公称尺寸的标准测量面，能反映被检孔或轴边界条件的无刻线长度测量器具。用它检验工件时只能判定工件尺寸是否在规定的验收极限范围内，不能测量出工件的实际尺寸。

用量规检验工件时，若通规能通过，止规不能通过，则被测工件应为合格品。

用于孔径检验的光滑极限量规称为塞规，其测量面为外圆柱面。其中，圆柱直径具有被检孔径最大实体尺寸（孔的下极限尺寸）的为孔用通规，具有被检孔径最小实体尺寸（孔的上极限尺寸）的为孔用止规（见图6-6）。

用于轴径检验的光滑极限量规称为环规或卡规，其测量面为内圆环面。其中，圆环直径具有被检轴径最大实体尺寸（轴的上极限尺寸）的为轴用通规，具有被检轴径最小实体尺寸（轴的下极限尺寸）的为轴用止规（见图6-7）。

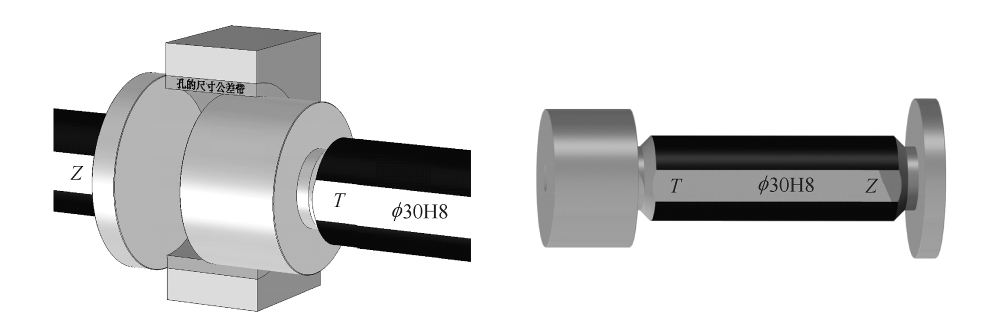


图 6-6　塞规

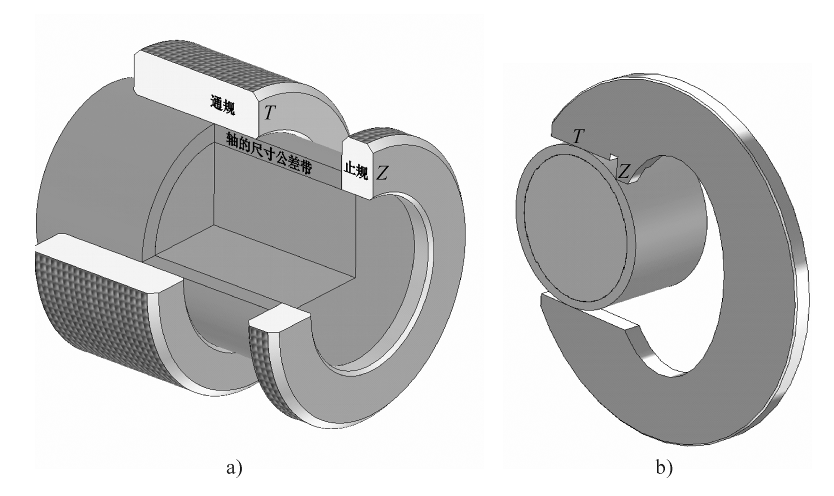


图 6-7　轴用环规与卡规
a）环规　b）卡规

6.3.1　光滑极限量规的作用

泰勒原则是设计极限量规的依据，用依据泰勒原则设计的极限量规检验工件，基本上可保证工件极限与配合的要求，达到互换的目的。

泰勒原则是指遵守包容要求的单一要素孔或轴的实际尺寸和形状误差综合形成的体外作用尺寸不允许超越最大实体尺寸，在孔或轴的任何位置上的实际尺寸不允许超越最小实体尺寸。

符合泰勒原则的量规如下：

1）通规用于控制工件的体外作用尺寸不超越孔或轴的最大实体尺寸。因此，通规测量面的形状应是与孔或轴形状相对应的完整表面（通常称为全形量规），其公称尺寸应等于工件的最大实体尺寸，且长度等于配合长度。

2）止规用于控制工件的实际尺寸不超越孔或轴的最小实体尺寸。所以，止规

测量面的形状应是点状的，两测量面之间的公称尺寸应等于工件的最小实体尺寸。

光滑极限量规国家标准规定，在保证被检验工件的形状误差不影响配合的性质时，可以使用偏离泰勒原则的量规。

实际应用中，由于量规制造和使用等原因，极限量规常常偏离上述原则。国家标准对某些偏离做了一些规定，例如：为了使用已经标准化的量规，允许通规的长度小于工件的配合长度；对大尺寸的孔和轴通常用非全形塞规（或球端杆规）和卡规代替笨重的全形通规。

对止规也不一定都是两点式接触，由于点接触容易磨损，一般以小平面、圆柱面或球面代替点。检验小孔的止规，常采用方便制造的全形塞规。对刚性较差的薄壁件，考虑到受力变形，常采用全形的止规。

6.3.2 光滑极限量规的分类

量规按其用途可分为工作量规、验收量规和校对量规。

（1）工作量规　工作量规是在工件加工制造中操作者检验工件时所使用的量规，通规用代号“T”表示，止规用代号“Z”表示。

（2）验收量规　验收量规是验收工件时检验人员或用户代表所使用的量规。验收量规一般不需要另行制造，它是从磨损较多但未超出磨损极限的工作量规的通规中挑选出来的。

操作者使用新的或磨损小的量规自检合格的工件，当检验人员用验收量规验收时也一定合格。因此，制造厂对工件进行检验时，操作者应该使用新的或者磨损较少的通规；检验部门应该使用与操作者相同型式的且已磨损较多的通规。

用户代表在用量规验收工件时，通规应接近工件的最大实体尺寸，止规应接近工件的最小实体尺寸。

用符合国家标准的量规检验工件，如判断有争议，应该使用下述尺寸的量规解决：

通规应等于或接近工件的最大实体尺寸；

止规应等于或接近工件的最小实体尺寸。

（3）校对量规　校对量规是用于检验工作量规的量规。由于孔用工作量规采用通用计量器具测量很方便，不需要校对量规，只有轴用工作量规才使用校对量规。校对量规可分为三种：校通－通（代号为TT），校止－通（代号为ZT）及校通－损（代号为TS）。

“校通－通”量规，它的作用是防止通规尺寸小于其最小极限尺寸。检验时应通过被校对的轴用通规。其公差带从通规的下极限偏差起，向轴用通规公差带内分布。

“校止－通”量规，它的作用是防止止规尺寸小于其最小极限尺寸。检验时应通过被校对的轴用止规。其公差带从止规的下极限偏差起，向轴用止规公差带内

分布。

“校通－损”量规，它的作用是防止通规超出磨损极限尺寸。检验时若通过了，则说明被校对的量规已超过磨损极限，应废弃。其公差带从通规的磨损极限起，向轴用通规公差带内分布。

6.3.3 光滑极限量规的设计与计算

1. 量规公差

量规尺寸公差带及其位置如图 6-8 所示，工作量规的通规由于经常通过被检工件，工作表面会有较大磨损，为使通规有一合理的使用寿命，除规定制造公差（T_1）外，其公差带的位置还向工件的尺寸公差带内部移动一个通端位置要素（Z_1）。

工作量规的止规由于不经常通过被检工件，磨损很小，故未规定磨损公差，只规定了制造公差（T_1）。

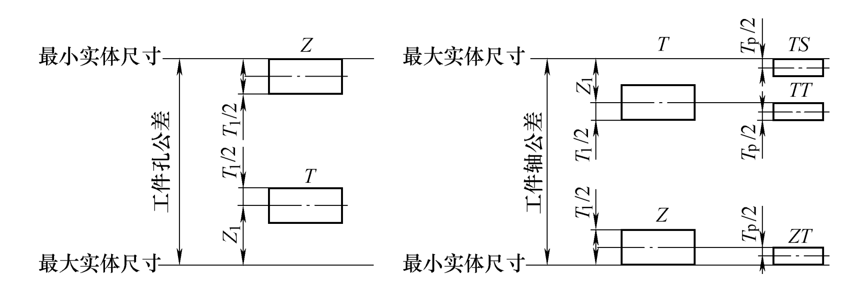


图 6-8 工作量规的公差带

工作量规的尺寸公差值（T_1）及其通端位置要素值（Z_1）应按表 6-5 的规定。

校对塞规尺寸公差（T_p）为被校对轴用工作量规尺寸公差的 1/2；校对塞规的尺寸公差中包含形状误差。

量规的形状和位置误差应在其尺寸公差带内。其公差为量规尺寸公差的 50%。当量规尺寸公差小于或等于 0.002mm 时，其形状和位置公差为 0.001mm。

2. 量规的技术要求

1）推荐的量规型式和应用尺寸范围见表 6-6。

2）制造量规的材料及热处理要求。量规宜采用合金工具钢（如 CrMn、CrMnW、CrMoV 等）、碳素工具钢（如 T10A、T12A 等）、渗碳钢（如 15 钢、20 钢等）及其他耐磨材料（如硬质合金）制造。钢制量规测量面的硬度不应小于 700HV（或 60HRC），并经过稳定性处理。

3）量规测量面的要求。量规的测量面不应有锈蚀、毛刺、黑斑、划痕等明显影响外观使用质量的缺陷。其他表面不应有锈蚀和裂纹。

4）塞规的测头与手柄的连接应牢固可靠，在使用过程中不应松动。量规在包

装前应经防锈处理，并妥善包装。

5）量规测量面的表面粗糙度 Ra 值不应大于表 6-7 或表 6-8 的规定。

表 6-5 工作量规的尺寸公差值 T_1 及其通端位置要素 Z_1 值（单位：μm）

工件孔或轴的公称尺寸/mm		工件孔或轴的公差等级																	
		IT6			IT7			IT8			IT9			IT10			IT11		
		孔或轴的公差	T_1	Z_1	孔或轴的公差	T_1	Z_1	孔或轴的公差	T_1	Z_1	孔或轴的公差	T_1	Z_1	孔或轴的公差	T_1	Z_1	孔或轴的公差	T_1	Z_1
大于	至	μm																	
—	3	6	1.0	1.0	10	1.2	1.6	14	1.6	2.0	25	2.0	3	40	2.4	4	60	3	6
3	6	8	1.2	1.4	12	1.4	2.0	18	2.0	2.6	30	2.4	4	48	3.0	5	75	4	8
6	10	9	1.4	1.6	15	1.8	2.4	22	2.4	3.2	36	2.8	5	58	3.6	6	90	5	9
10	18	11	1.6	2.0	18	2.0	2.8	27	2.8	4.0	43	3.4	6	70	4.0	8	110	6	11
18	30	13	2.0	2.4	21	2.4	3.4	33	3.4	5.0	52	4.0	7	84	5.0	9	130	7	13
30	50	16	2.4	2.8	25	3.0	4.0	39	4.0	6.0	62	5.0	8	100	6.0	11	160	8	16
50	80	19	2.8	3.4	30	3.6	4.6	46	4.6	7.0	74	6.0	9	120	7.0	13	190	9	19
80	120	22	3.2	3.8	35	4.2	5.4	54	5.4	8.0	87	7.0	10	140	8.0	15	220	10	22
120	180	25	3.8	4.4	40	4.8	6.0	63	6.0	9.0	100	8.0	12	160	9.0	18	250	12	25
180	250	29	4.4	5.0	46	5.4	7.0	72	7.0	10.0	115	9.0	14	185	10.0	20	290	14	29
250	315	32	4.8	5.6	52	6.0	8.0	81	8.0	11.0	130	10.0	16	210	12.0	22	320	16	32
315	400	36	5.4	6.2	57	7.0	9.0	89	9.0	12.0	140	11.0	18	230	14.0	25	360	18	36
400	500	40	6.0	7.0	63	8.0	10.0	97	10.0	14.0	155	12.0	20	250	16.0	28	400	20	40

工件孔或轴的基本尺寸/mm		工件孔或轴的公差等级														
		IT12			IT13			IT14			IT15			IT16		
		孔或轴的公差	T_1	Z_1	孔或轴的公差	T_1	Z_1	孔或轴的公差	T_1	Z_1	孔或轴的公差	T_1	Z_1	孔或轴的公差	T_1	Z_1
大于	至	μm														
—	3	100	4	9	140	6	14	250	9	20	400	14	30	600	20	40
3	6	120	5	11	180	7	16	300	11	25	480	16	35	750	25	50
6	10	150	6	13	220	8	20	360	13	30	580	20	40	900	30	60
10	18	180	7	15	270	10	24	430	15	34	700	24	50	1100	35	75
18	30	210	8	18	330	12	28	520	18	40	840	28	60	1300	40	90

（续）

工件孔或轴的基本尺寸/mm		工件孔或轴的公差等级														
		IT12			IT13			IT14			IT15			IT16		
		孔或轴的公差	T_1	Z_1	孔或轴的公差	T_1	Z_1	孔或轴的公差	T_1	Z_1	孔或轴的公差	T_1	Z_1	孔或轴的公差	T_1	Z_1
大于	至	μm														
30	50	250	10	22	390	14	34	620	22	50	1000	34	75	1600	50	110
50	80	300	12	26	460	16	40	740	26	60	1200	40	90	1900	60	130
80	120	350	14	30	540	20	46	870	30	70	1400	46	100	2200	70	150
120	180	400	16	35	630	22	52	1000	35	80	1600	52	120	2500	80	180
180	250	460	18	40	720	26	60	1150	40	60	1850	60	130	2900	90	200
250	315	520	20	45	810	28	66	1300	45	100	2100	66	150	3200	100	220
315	400	570	22	50	890	32	74	1400	50	110	2300	74	170	3600	110	250
400	500	630	24	55	970	36	80	1550	55	120	2500	80	190	4000	120	280

表 6-6　推荐的量规型式应用尺寸范围

用　　途	推荐顺序	量规的工作尺寸/mm			
		≤18	＞18～100	＞100～315	＞315～500
工件孔用的通端量规型式	1	全形塞规		不全形塞规	球端杆规
	2	—	不全形塞规或片形塞规	片形塞规	—
工件孔用的止端量规型式	1	全形塞规	全形或片形塞规		球端杆规
	2	—	不全形塞规		—
工件轴用的通端量规型式	1	环规		卡规	
	2	卡规		—	
工件轴用的止端量规型式	1	卡规			
	2	环规	—		

3. 量规工作尺寸的计算

量规工作尺寸的计算步骤如下：

1）查出被检验工件的极限偏差。

2）查出工作量规的尺寸公差 T_1 和位置要素值 Z_1，并确定量规的几何公差。

3）画出工件和量规的公差带图。

4）计算量规的极限偏差。

5）计算量规的极限尺寸。

表 6-7 量规测量面的表面粗糙度 *Ra* 值

<table>
<tr><td rowspan="3">工作量规</td><td colspan="3">工作量规的公称尺寸/mm</td></tr>
<tr><td>≤120</td><td>>120～315</td><td>>315～500</td></tr>
<tr><td colspan="3">工作量规测量面的表面粗糙度 Ra 值/μm</td></tr>
<tr><td>IT6 级孔用工作塞规</td><td>0.05</td><td>0.10</td><td>0.20</td></tr>
<tr><td>IT7 级～IT9 级孔用工作塞规</td><td>0.10</td><td>0.20</td><td>0.40</td></tr>
<tr><td>IT10 级～IT12 级孔用工作塞规</td><td>0.20</td><td>0.40</td><td rowspan="2">0.80</td></tr>
<tr><td>IT13 级～IT16 级孔用工作塞规</td><td>0.40</td><td>0.80</td></tr>
<tr><td>IT6 级～IT9 级轴用工作环规</td><td>0.10</td><td>0.20</td><td>0.40</td></tr>
<tr><td>IT10 级～IT12 级轴用工作环规</td><td>0.20</td><td>0.40</td><td rowspan="2">0.80</td></tr>
<tr><td>IT13 级～IT16 级轴用工作环规</td><td>0.40</td><td>0.80</td></tr>
</table>

表 6-8 校对塞规测量面的表面粗糙度 *Ra* 值

<table>
<tr><td rowspan="3">校对塞规</td><td colspan="3">校对塞规的公称尺寸/mm</td></tr>
<tr><td>≤120</td><td>>120～315</td><td>>315～500</td></tr>
<tr><td colspan="3">校对量规测量面的表面粗糙度 Ra 值/μm</td></tr>
<tr><td>IT6 级～IT9 级轴用工作环规的校对塞规</td><td>0.05</td><td>0.10</td><td>0.20</td></tr>
<tr><td>IT10 级～IT12 级轴用工作环规的校对塞规</td><td>0.10</td><td>0.20</td><td rowspan="2">0.40</td></tr>
<tr><td>IT13 级～IT16 级轴用工作环规的校对塞规</td><td>0.20</td><td>0.40</td></tr>
</table>

【例 6-2】 设计检验 ϕ60H8Ⓔ孔用工作量规与 ϕ60g7Ⓔ轴用工作量规。

解： 1）查标准公差数值表（见表 2-7）和基本偏差数值表（见表 2-9）可知 IT7、IT8 及孔和轴的极限偏差分别如下：

$$IT7 = 0.030\text{mm}$$

$$IT8 = 0.046\text{mm}$$

$$EI = 0,\ ES = +0.046\text{mm}$$

$$es = -0.010\text{mm},\ ei = -0.040\text{mm}$$

2）查表 6-5 得工作量规的尺寸公差 T_1 和通端位置要素 Z_1 值如下：

塞规：$T_1 = 0.0046\text{mm}$，$Z_1 = 0.007\text{mm}$

环规：$T_1 = 0.0036\text{mm}$，$Z_1 = 0.0046\text{mm}$

3）确定工作量规的形状公差。

$$塞规的形状公差 = 0.0046\text{mm}/2 = 0.0023\text{mm}$$

$$卡规的形状公差 = 0.0036\text{mm}/2 = 0.0018\text{mm}$$

4）画出孔 ϕ60H8Ⓔ、轴 ϕ60g7Ⓔ及其工作量规的公差带图（见图6-9）。

5）计算 ϕ60H8Ⓔ孔用工作量规与 ϕ60g7Ⓔ轴用工作量规的极限偏差与极限尺寸。

塞规通规的极限偏差为：

$$es = 0 + 0.007\text{mm} + 0.0046\text{mm}/2 = +0.0093\text{mm}$$

$$ei = 0.0093\text{mm} - 0.0046\text{mm} = +0.0047\text{mm}$$

塞规通规的极限尺寸为：

$$d_{max} = 60.0093\text{mm}$$

$$d_{min} = 60.0047\text{mm}$$

尺寸标注为：$\phi 60.0093^{0}_{-0.0046}$

塞规止规的极限偏差为：

$$es = +0.046\text{mm}$$

$$ei = 0.046\text{mm} - 0.0046\text{mm} = +0.0414\text{mm}$$

塞规止规的极限尺寸为：

$$d_{max} = 60.0460\text{mm}$$

$$d_{min} = 60.0414\text{mm}$$

尺寸标注为：$\phi 60.0460^{0}_{-0.0046}$

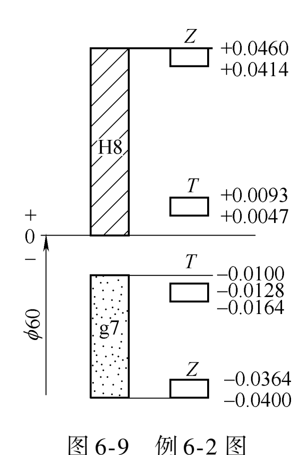


图6-9 例6-2图

环规通规的极限偏差为：

$$ES = -0.010\text{mm} - 0.0046\text{mm} + 0.0036\text{mm}/2 = -0.0128\text{mm}$$

$$EI = -0.0128\text{mm} - 0.0036\text{mm} = -0.0164\text{mm}$$

环规通规的极限尺寸为：

$$D_{max} = 60\text{mm} - 0.0128\text{mm} = 59.9872\text{mm}$$

$$D_{min} = 59.9872\text{mm} - 0.0036\text{mm} = 59.9836\text{mm}$$

尺寸标注为：$\phi 59.9836^{+0.0036}_{0}$

环规止规的极限偏差为：

$$EI = -0.040\text{mm}$$

$$ES = -0.040\text{mm} + 0.0036\text{mm} = -0.0364\text{mm}$$

环规止规的极限尺寸为：

$$D_{max} = 60\text{mm} - 0.0364\text{mm} = 59.9636\text{mm}$$

$$D_{min} = 60\text{mm} - 0.04\text{mm} = 59.96\text{mm}$$

尺寸标注为：$\phi 59.960^{0.0036}_{0}$

自测习题六

1. 为什么要规定安全裕度和验收极限？
2. 什么是验收极限？标准规定了哪两种验收极限？

3. 光滑极限量规的设计依据是什么？

4. 符合泰勒原则的量规，应怎样确定通规与止规的测量面？

5. 光滑极限量规按用途分为哪几种类型？

6. 计算检验 ϕ36k6 工件的光滑极限量规工作量规的极限尺寸，并绘出量规的工作图。

7. 工件尺寸为 ϕ50h6，试确定该轴的验收极限，并选择合适的计量器具。

第7章　圆锥的互换性与检测

7.1　概述

7.1.1　圆锥结合的特点

1）间隙或过盈可以调整。通过内、外圆锥面的轴向位移，可以调整间隙或过盈来满足不同的工作要求；能补偿磨损，延长使用寿命；但在圆柱配合中，间隙、过盈的大小不能调整。

2）对中性好，即易保证配合的同轴度要求。由于间隙可以调整，因而可以消除间隙，实现内外圆锥轴线的对中（内外圆锥在轴向力的作用下自动对中，以保证内外圆锥体的轴线具有较高精度的同轴度）。容易拆卸，且经多次拆装不降低同轴度。而圆柱间隙配合中，孔与轴的轴线不重合。

3）圆锥结合具有较好的自锁性和密封性。内外圆锥表面成对研磨，虽无互换性，但配合起来具有良好的自锁性和密封性（有过盈，钻头锥柄与主轴连接）。

4）圆锥配合结构复杂，影响互换性的参数比较多，加工和检验都比较困难，不适合于孔轴轴向相对位置要求较高的场合。

7.1.2　锥度与锥角的术语及定义

（1）圆锥表面　与轴线成一定角度，且一端相交于轴线的一条直线（母线），围绕着该轴线旋转形成的表面称为圆锥表面，如图 7-1 所示。

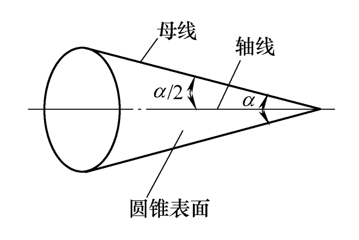


图 7-1　圆锥表面

（2）圆锥　圆锥是指由圆锥表面与一定线性尺寸和角度尺寸所限定的几何体。圆锥分为内圆锥和外圆锥。外圆锥是外表面为圆锥表面的几何体，如图 7-2 所示；内圆锥是内部表面为圆锥表面的几何体，如图 7-3 所示。

（3）圆锥角　在与圆锥平行并通过轴线的截面内，两条素线（圆锥表面与轴向截面的交线）间的夹角称为圆锥角。圆锥角的代号为 α，斜角（锥角之半）的

代号为 $\alpha/2$。

（4）圆锥素线角　圆锥素线与其轴线之间的夹角，它等于圆锥角的一半，即 $\alpha/2$。

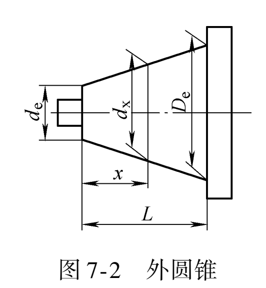


图 7-2　外圆锥

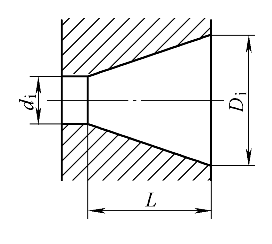


图 7-3　内圆锥

（5）圆锥直径　与圆锥轴线垂直的截面内的直径，有内、外圆锥的最大直径 D_i、D_e，内、外圆锥的最小直径 d_i、d_e，给定截面 x 处圆锥直径 d_x。

（6）圆锥长度　圆锥的最大直径截面与最小直径截面之间的轴向距离。圆锥长度用 L 表示，如图 7-2、图 7-3 所示。

（7）圆锥配合长度　内、外圆锥配合面的轴向距离，用符号 H 表示。

（8）锥度　两个垂直圆锥轴线截面的圆锥直径之差与该两截面之间的轴向距离之比，用符号 C 表示。下式中，圆锥最大直径为 D，圆锥最小直径为 d，圆锥长度为 L。

$$C = \frac{D - d}{L} = 2\tan\frac{\alpha}{2}$$

锥度常用比例或分数表示，如 $C = 1:20$ 或 $C = 1/20$。

7.1.3　锥度与锥角系列

为减少加工圆锥形体零件所用专用刀具、量具种类与规格而采用国家标准的形式进行规定。一般用途：参考 GB/T 157—2001（见表 7-1），其中第一系列优先选用，第二系列为第一系列不满足时选用。特殊用途：参考 GB/T 157—2001（见表 7-2），通常只适用于表中说明栏所规定的范围。特殊用途的莫氏锥度在工具行业中应用极广。

表 7-1　一般用途圆锥的锥度与锥角系列

基本值		推荐值			
系列 1	系列 2	圆锥角 α			锥度 C
		(°)(′)(″)	(°)	rad	
120°		—	—	2.09439510	1:0.2886751
90°		—	—	1.57079633	1:0.5000000
	75°	—	—	1.30899694	1:0.6516127

（续）

基本值		推荐值			
系列 1	系列 2	圆锥角 α			锥度 C
		（°）（′）（″）	（°）	rad	
60°		—	—	1. 04719755	1∶0. 8660254
45°		—	—	0. 78539816	1∶1. 2071068
30°		—	—	0. 52359878	1∶1. 8660254
1∶3		18°55′28. 7199″	18. 92464442°	0. 33029735	—
	1∶4	14°15′0. 1177″	14. 25003270°	0. 24870999	—
1∶5		11°25′16. 2706″	11. 42118627°	0. 19933730	—
	1∶6	9°31′38. 2202″	9. 52728338°	0. 16628246	—
	1∶7	8°10′16. 4408″	8. 17123356°	0. 14261493	—
	1∶8	7°9′9. 6075″	7. 15266875°	0. 12483762	—
1∶10		5°43′29. 3176″	5. 72481045°	0. 09991679	—
	1∶12	4°46′18. 7970″	4. 77188806°	0. 08328516	—
	1∶15	3°49′5. 8975″	3. 81830487°	0. 06664199	—
1∶20		2°51′51. 0925″	2. 86419237°	0. 04998959	—
1∶30		1°54′34. 8570″	1. 90968251°	0. 03333025	—
1∶50		1°8′45. 1586″	1. 14587740°	0. 01999933	—
1∶100		34′22. 6309″	0. 57295302°	0. 00999992	—
1∶200		17′11. 3219″	0. 28647830°	0. 00499999	—
1∶500		6′52. 5295″	0. 11459152°	0. 00200000	—

表 7-2　特殊用途圆锥的锥度与锥角系列

基本值	推荐值			
	圆锥角 α			锥度 C
	（°）（′）（″）	（°）	rad	
11°54′	—	—	0. 20769418	1∶4. 7974511
8°40′	—	—	0. 15126187	1∶6. 5984415
7°	—	—	0. 12217305	1∶8. 1749277
1∶38	1°30′27. 7080″	1. 50769667°	0. 02631427	—
1∶64	0°53′42. 8220″	0. 89522834°	0. 01562468	—
7∶24	16°35′39. 4443″	16. 59429008°	0. 28962500	1∶3. 4285714
1∶12. 262	4°40′12. 1514″	4. 67004205°	0. 08150761	—
1∶12. 972	4°24′52. 9039″	4. 41469552°	0. 07705097	—
1∶15. 748	3°38′13. 4429″	3. 63706747°	0. 06347880	—

（续）

基本值	推荐值			
	圆锥角 α			锥度 C
	(°)(′)(″)	(°)	rad	
6∶100	3°26′12.1776″	3.43671600°	0.05998201	1∶16.6666667
1∶18.779	3°3′1.2070″	3.05033527°	0.05323839	—
1∶19.002	3°0′52.3956″	3.01455434°	0.05261390	—
1∶19.180	2°59′11.7258″	2.98659050°	0.05212584	—
1∶19.212	2°58′53.8255″	2.98161820°	0.05203905	—
1∶19.254	2°58′30.4217″	2.97511713°	0.05192559	—
1∶19.264	2°58′24.8644″	2.97357343°	0.05189865	—
1∶19.922	2°52′31.4463″	2.87540176°	0.05018523	—
1∶20.020	2°51′40.7960″	2.86133223°	0.04993967	—
1∶20.047	2°51′26.9283″	2.85748008°	0.04987244	—
1∶20.288	2°49′24.7802″	2.82355006°	0.04928025	—
1∶23.904	2°23′47.6244″	2.39656232°	0.04182790	—
1∶28	2°2′45.8174″	2.04606038°	0.03571049	—
1∶36	1°35′29.2096″	1.59144711°	0.02777599	—
1∶40	1°25′56.3516″	1.43231989°	0.02499870	—

7.2 圆锥的公差与配合

国家标准 GB/T 11334—2005，适用于锥度为 1∶3 ~ 1∶500、圆锥长度为 6 ~ 630mm 的光滑圆锥工件（即对锥齿轮、锥螺纹等不适用）。

7.2.1 圆锥公差的基本术语及定义

1. 公称圆锥

由设计给定的理想形状的圆锥称为公称圆锥。公称圆锥可用两种形式确定：一种是以一个公称圆锥直径（最大圆锥直径 D、最小圆锥直径 d 或给定截面圆锥直径 d_x）、公称圆锥长度 L 和公称圆锥角 α（或公称锥度 C）来确定；另一种是以两个公称圆锥直径（D 和 d）和公称圆锥长度 L 来确定。

2. 实际圆锥

实际存在并与周围介质分隔的圆锥称为实际圆锥。

3. 实际圆锥直径 d_a

实际圆锥上的任一直径称为实际圆锥直径。

4. 实际圆锥角 α

在实际圆锥的任一轴向截面内，包容圆锥素线且距离为最小的两对平行直线之间的夹角，如图 7-4 所示。

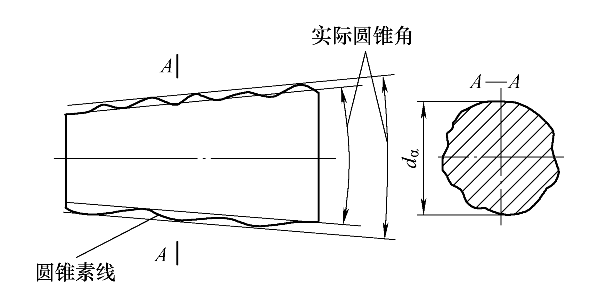


图 7-4 实际圆锥、实际圆锥直径及实际圆锥角

5. 极限圆锥及极限圆锥直径

极限圆锥指与公称圆锥共轴且圆锥角相等，直径分别为上极限直径（D_{max}、d_{max}）和下极限直径（D_{min}和 d_{min}）的两个圆锥，如图 7-5 所示。在垂直圆锥轴线的任一截面上，这两个圆锥的直径差都相等。

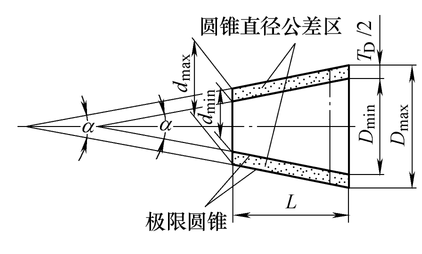


图 7-5 极限圆锥

6. 极限圆锥角

允许的上极限圆锥角 α_{max}或下极限圆锥角 α_{min}，如图 7-6 所示。

7. 给定截面圆锥直径公差区

在给定的圆锥截面内，由两个同心圆所限定的区域。用示意图表示给定截面圆锥直径公差区时，如图 7-7 所示。

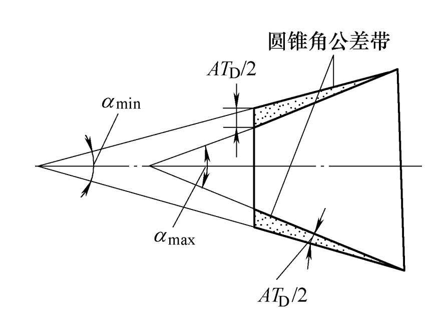


图 7-6 极限圆锥角

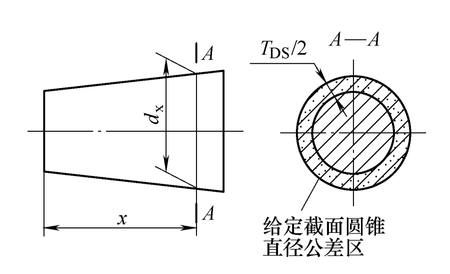


图 7-7 给定截面圆锥直径公差区

7.2.2 圆锥公差的项目和给定方法

1. 圆锥公差项目及数值

为了满足圆锥连接功能和使用要求，圆锥公差国家标准 GB/T 11334—2005 规定了四项公差，有圆锥直径公差 T_D、圆锥角公差 AT、圆锥的形状公差 T_F 和给定截面圆锥直径公差 T_{DS}。

（1）圆锥直径公差 T_D 及公差值　圆锥直径的允许变动量为圆锥直径公差（T_D）。两个极限圆锥所限制的区域为圆锥直径公差区。圆锥直径公差值以公称圆锥直径（一般取最大圆锥直径 D）为公称尺寸，按 GB/T 1800.3 规定的标准公差选取。

（2）圆锥角公差 AT 及公差值　两个极限圆锥角所限制的区域为圆锥角公差区。圆锥角的允许变动量为圆锥角公差 AT（AT_D 或 AT_α）。

圆锥角公差 AT 共分 12 个公差等级，用 $AT1$、$AT2$…、$AT12$ 表示。其中，$AT1$ 精度最高，$AT12$ 精度最低，圆锥角公差的数值见表 7-4。

圆锥角公差可用两种形式表示：

1）角度值 AT_α，以角度单位微弧度（μrad）或以度（°）、分（′）、秒（″）表示；

2）线性值 AT_D，以长度单位微米（μm）表示。

AT_D 和 AT_α 的换算关系如下：

$$AT_D = AT_\alpha \times L \times 10^{-3}$$

式中，AT_D 单位为 μm；AT_α 单位为 μrad；L 单位为 mm。

表 7-4　圆锥角公差的数值

公称圆锥长度 L/mm		圆锥角公差等级								
		$AT1$			$AT2$			$AT3$		
		AT_α		AT_D	AT_α		AT_D	AT_α		AT_D
大于	至	μrad	(″)	μm	μrad	(″)	μm	μrad	(″)	μm
6	10	50	10	>0.3~0.5	80	16	>0.5~0.8	125	26	>0.8~1.3
10	16	40	8	>0.3~0.6	63	13	>0.6~1.0	100	21	>1.0~1.6
16	25	31.5	6	>0.5~0.8	50	10	>0.8~1.3	80	16	>1.3~2.0
25	40	25	5	>0.6~1.0	40	8	>1.0~1.6	63	13	>1.6~2.5
40	63	20	4	>0.8~1.3	31.5	6	>1.3~2.0	50	10	>2.0~3.2
63	100	16	3	>1.0~1.6	25	5	>1.6~2.5	40	8	>2.5~4.0
100	160	12.5	2.5	>1.3~2.0	20	4	>2.0~3.2	31.5	6	>3.2~5.0
160	250	10	2	>1.6~2.5	16	3	>2.5~4.0	25	5	>4.0~6.3

（续）

公称圆锥长度 L/mm		圆锥角公差等级								
		$AT1$			$AT2$			$AT3$		
		AT_{α}		AT_{D}	AT_{α}		AT_{D}	AT_{α}		AT_{D}
大于	至	μrad	(″)	μm	μrad	(″)	μm	μrad	(″)	μm
250	400	8	1.5	>2.0~3.2	12.5	2.5	>3.2~5.0	20	4	>5.0~8.0
400	630	6.3	1	>2.5~4.0	10	2	>4.0~6.3	16	3	>6.3~10.0

公称圆锥长度 L/mm		圆锥角公差等级								
		$AT4$			$AT5$			$AT6$		
		AT_{α}		AT_{D}	AT_{α}		AT_{D}	AT_{α}		AT_{D}
大于	至	μrad	(″)	μm	μrad	(′)(″)	μm	μrad	(′)(″)	μm
6	10	200	41	>1.3~2.0	314	1′05″	>2.0~3.2	500	1′43″	>3.2~5.0
10	16	160	33	>1.6~2.5	250	52″	>2.5~4.0	400	1′22″	>4.0~6.3
16	25	125	26	>2.0~3.2	200	41″	>3.2~5.0	315	1′05″	>5.0~8.0
25	40	100	21	>2.5~4.0	160	33″	>4.0~6.3	250	52″	>6.3~10.0
40	63	80	16	>3.2~5.0	125	26″	>5.0~8.0	200	41″	>8.0~12.5
63	100	63	13	>4.0~6.3	100	21″	>6.3~10.0	160	33″	>10.0~16
100	160	50	10	>5.0~8.0	80	16″	>8.0~12.5	125	26″	>12.5~20.0
160	250	40	8	>6.3~10.0	63	13″	>10.0~16	100	21″	>16.0~25.0
250	400	31.5	6	>8.0~12.5	50	10″	>12.5~20.0	80	16″	>20.0~32.0
400	630	25	5	>10.0~16	40	8″	>16.0~25.0	63	13″	>25.0~40.0

公称圆锥长度 L/mm		圆锥角公差等级								
		$AT7$			$AT8$			$AT9$		
		AT_{α}		AT_{D}	AT_{α}		AT_{D}	AT_{α}		AT_{D}
大于	至	μrad	(′)(″)	μm	μrad	(′)(″)	μm	μrad	(′)(″)	μm
6	10	800	2′45″	>5.0~8.0	1250	4′18″	>8.0~12.5	2000	6′52″	>12.5~20.0
10	16	630	2′10″	>6.3~10.0	1000	3′26″	>10.0~16	1600	5′30″	>16.0~25.0
16	25	500	1′43″	>8.0~12.5	800	2′45″	>12.5~20.0	1250	4′18″	>20.0~32.0
25	40	400	1′22″	>10.0~16	630	2′10″	>16.0~25.0	1000	3′26″	>25.0~40.0
40	63	315	1′05″	>12.5~20.0	500	1′43″	>20.0~32.0	800	2′45″	>32.0~50.0
63	100	250	52″	>16.0~25.0	400	1′22″	>25.0~40.0	630	2′10″	>40.0~63.0
100	160	200	41″	>20.0~32.0	315	1′05″	>32.0~50.0	500	1′43″	>50.0~80.0
160	250	160	33″	>25.0~40.0	250	52″	>40.0~63.0	400	1′22″	>63.0~100
250	400	125	16″	>32.0~50.0	200	41″	>50.0~80.0	315	1′05″	>80.0~125.0
400	630	100	21″	>40.0~63.0	160	33″	>63.0~100	250	52″	>100.0~160.0

（续）

公称圆锥长度 L/mm		圆锥角公差等级								
		AT10			AT11			AT12		
		AT_{α}		AT_D	AT_{α}		AT_D	AT_{α}		AT_D
大于	至	μrad	(′)(″)	μm	μrad	(′)(″)	μm	μrad	(′)(″)	μm
6	10	3150	10′49″	>20.0～32.0	5000	17′10″	>32.0～50.0	8000	27′28″	>50.0～80.0
10	16	2500	8′35″	>25.0～40.0	4000	13′44″	>40.0～63.0	6300	21′38″	>63.0～100
16	25	2000	6′52″	>32.0～50.0	3150	10′49″	>50.0～80.0	5000	17′10″	>80.0～125.0
25	40	1600	5′30″	>40.0～63.0	2500	8′35″	>63.0～100	4000	13′44″	>100.0～160.0
40	63	1250	4′18″	>50.0～80.0	2000	6′52″	>80.0～125.0	3150	10′49″	>125.0～200.0
63	100	1000	3′26″	>63.0～100	1600	5′30″	>100.0～160.0	2500	8′35″	>160.0～250.0
100	160	800	2′45″	>80.0～125.0	1250	4′18″	>125.0～200.0	2000	6′52″	>200.0～320.0
160	250	630	2′10″	>100.0～160.0	1000	3′26″	>160.0～250.0	1600	5′30″	>250.0～400.0
250	400	500	1′43″	>125.0～200.0	800	2′45″	>200.0～320.0	1250	4′18″	>320.0～500.0
400	630	400	1′22″	>160.0～250.0	630	2′10″	>250.0～400.0	1000	3′26″	>400.0～630.0

若该公差数值用于棱体的角度时，以该角短边长度作为 L 选取公差值。

（3）圆锥的形状公差 T_F　圆锥的形状公差包括素线直线度公差和横截面圆度公差。在图样上可以标注这两项形状公差或其中某一项公差，或者标注圆锥的面轮廓度公差。

（4）给定截面圆锥直径公差 T_{DS}　以给定截面圆锥直径 d_x 为公称尺寸，按 GB/T 1800.3 规定的标准公差选取。

2. 圆锥公差的给定方法

1）给出圆锥的公称圆锥角 α（或锥度 C）和圆锥直径公差 T_D。由 T_D 确定两个极限圆锥。此时圆锥角误差和圆锥的形状误差均应在极限圆锥所限定的区域内。当对圆锥角公差、圆锥的形状公差有更高的要求时，可再给出圆锥角公差 AT、圆锥的形状公差 T_F。此时，AT 和 T_F 仅占 T_D 的一部分。

2）在假定圆锥素线为理想直线的情况下给出给定截面圆锥直径公差 T_{DS} 和圆锥角公差 AT。此时，给定截面圆锥直径和圆锥角应分别满足这两项公差的要求。T_{DS} 和 AT 的关系如图 7-8 所示。

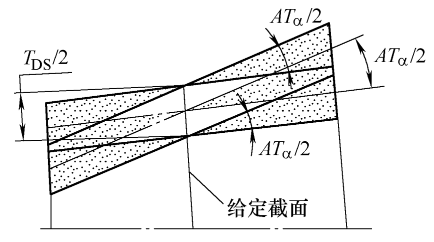


图 7-8　T_{DS} 和 AT 的关系

7.2.3 圆锥的配合

GB/T 12360—2005《产品几何量技术规范 圆锥配合》规定了圆锥配合的形成、术语、定义和一般规定。标准适用于锥度 C 为 1∶3 ~ 1∶500、圆锥长度为 6 ~ 630mm、圆锥直径≤500mm 的光滑圆锥的配合。

圆锥配合是由相同尺寸的内外圆锥形成配合，公差带数值按大径 D 确定，其间隙或过盈在垂直于轴线方向上形成，与锥角大小无关。根据内、外锥相对于轴线位置的不同，可以获得间隙、过渡或过盈配合等不同配合性质的配合。①间隙配合：具有间隙，且在装配和使用过程中间隙大小可以调整。常用于有相对运动的机构中，如某些车床主轴的圆锥轴颈与圆锥滑动轴承衬套的配合。②过盈配合：具有过盈，它借助于相互配合的圆锥面间的自锁，产生较大的摩擦力来传递转矩。其特点是一旦过盈配合不再需要，内、外圆锥体可以拆开，例如钻头（或铰刀）的圆锥柄与机床主轴圆锥孔的结合、圆锥形摩擦离合器等。③过渡配合：接触紧密，间隙为零或略小于零。主要用于定心或密封的场合，如锥形旋塞、发动机中气阀和阀座的配合等。通常要将内、外锥配对研磨，故这类配合一般没有互换性。

圆锥配合按内、外圆锥轴向相对位置的确定方法可分成以下两种：

（1）结构型圆锥配合 由圆锥结构确定装配位置，内、外圆锥公差区之间的相互关系。结构型圆锥配合可以是间隙配合、过渡配合或过盈配合。图 7-9a 所示为轴肩接触得到间隙配合的结构型圆锥配合，图 7-9b 所示为由结构尺寸 a 得到过盈配合的结构型圆锥配合。

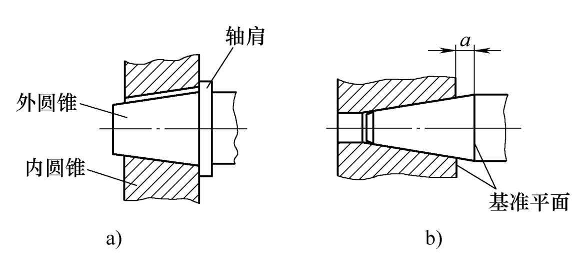


图 7-9 结构型圆锥配合示例

结构型圆锥配合的选用：

1）结构型圆锥配合的圆锥直径公差带的代号和数值及公差等级，采用 GB/T 1800.1—2009《产品几何技术规范 极限与配合 第 1 部分：公差、偏差和配合的基础》规定的标准公差系列与基本偏差系列。为了减少定值刀具的数目，推荐优先采用基孔制配合，即内圆锥直径基本偏差为 H。

2）圆锥直径配合量 T_{Df}：等于两结合圆锥内、外直径公差之和。其公差值的大小，直接影响配合精度。推荐内、外圆锥直径公差不低于 IT9 级。如对接触精度有更高要求，可按圆锥公差国家标准（GB/T 11334—2005）规定的圆锥角公差 AT

系列值（见表7-4），给出圆锥角极限偏差及圆锥的形状公差。

3）配合的基本偏差，通常在 D（d）至 ZC（zc）中选择，应按优先、常用、任意公差带组成配合为顺序选用配合。

（2）位移型圆锥配合　内、外圆锥在装配时作一定相对轴向位移（E_a）确定的相互关系。

位移型圆锥配合可以是间隙配合或过盈配合。图7-10a所示为给定轴向位移 E_a 得到间隙配合的位移型圆锥配合，图7-10b所示为给定装配力 F_s 得到过盈配合的位移型圆锥配合。

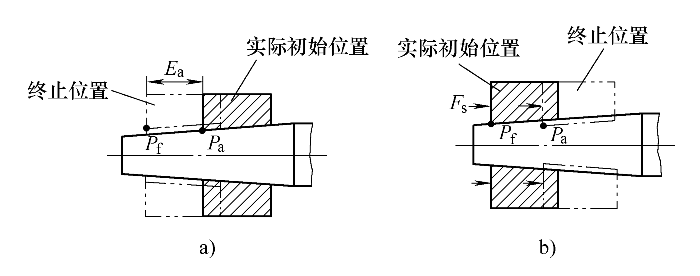


图7-10　位移型圆锥配合示例

位移型圆锥配合的选用：

1）位移型圆锥配合的圆锥直径公差带可根据对终止位置基面距的要求和对接触精度的要求来选取。如对基面距有要求，公差等级一般在IT8～IT12之间选取，必要时，应通过计算来选取和校核内、外圆锥的公差带；若对基面距无严格要求，可选较低的直径公差等级，以便使加工更经济。如对接触精度要求较高，可用给定圆锥角公差的办法来满足。为了计算和加工方便，GB/T 12360—2005推荐位移型圆锥的基本偏差用H、h或JS、js的组合。

2）内、外圆锥公差带的基本偏差用H、h或JS、js的组合。

3）轴向位移的大小，将决定配合间隙量或过盈量的大小。轴向位移量的极限值由功能要求的极限间隙或极限过盈量计算得到，计算式如下：

对于间隙配合：

$$E_{amax}=\frac{1}{C}|X_{max}|$$

$$E_{amin}=\frac{1}{C}|X_{min}|$$

$$T_E=E_{amax}-E_{amin}=\frac{1}{C}|X_{max}-X_{min}|$$

式中，C 为锥度；X_{max} 为配合最大间隙量；X_{min} 为配合最小间隙量；T_E 为轴向公差。

对于过盈配合：

$$E_{amax}=\frac{1}{C}|Y_{max}|$$

$$E_{\text{amin}}=\frac{1}{C}|Y_{\min}|$$

$$T_{\text{E}}=E_{\text{amax}}-E_{\text{amin}}=\frac{1}{C}|Y_{\max}-Y_{\min}|$$

式中，C 为锥度；$Y_{\max}$为配合最大过盈量；$Y_{\min}$为配合最小过盈量；T_{E} 为轴向公差。

7.3 圆锥的标注

圆锥结构是机械零件中最常见的结构，其具有连接、装配、定心、密封及调节等功能，因此，应根据圆锥不同的功能，进行尺寸及公差的标注。

7.3.1 圆锥的尺寸注法

1. 特征功能参数

根据圆锥的功能要求，应选用表 7-5 中的特征参数相互组合进行标注。

表 7-5 圆锥的特征参数（摘自 GB/T 15754—1995）

特征参数	字母符号	标注示例	
		优先方法	可选方法
锥度	C	1∶5	0.2∶1
圆锥角	α	1/5	20%
最大端圆锥直径	D	35°	0.6rad
最小端圆锥直径	d	—	—
给定横截面处圆锥直径	d_{x}	—	—
圆锥长度	L	—	—
总长	L'	—	—
给定横截面的长度	L_{x}		

2. 尺寸标注

圆锥尺寸可采用圆锥直径 D、圆锥角 α 和圆锥长度 L 相互组合的方法标注，如图 7-11a、b、c、d 所示。

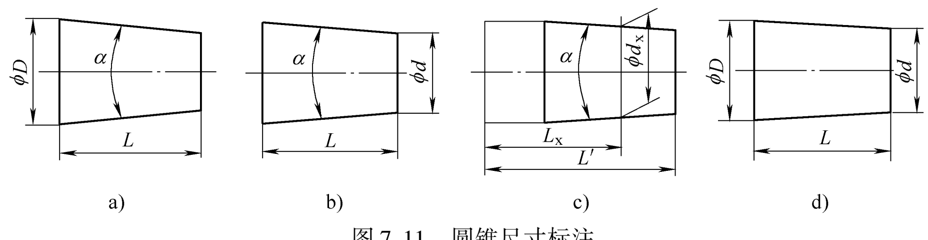


图 7-11 圆锥尺寸标注

3. 锥度的标注

在图样上，应采用图 7-12 所示的锥度的图形符号表示圆锥，该符号应配置在基准线上，如图 7-13 所示。表示圆锥的图形符号和锥度应靠近圆锥轮廓标注，基准线应通过指引线与圆锥的轮廓素线相连。基准线应与圆锥的轴线平行，图形符号的方向应与圆锥倾斜方向一致。锥度标注如图 7-14 所示。

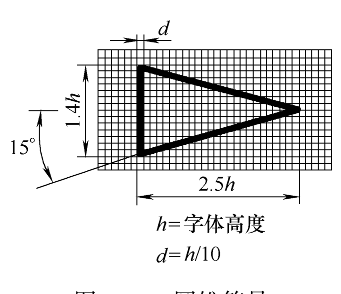


图 7-12 圆锥符号

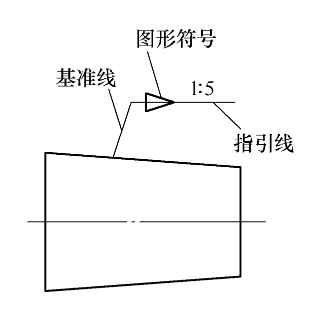
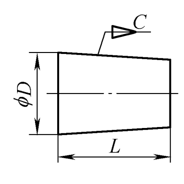
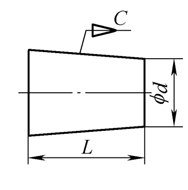
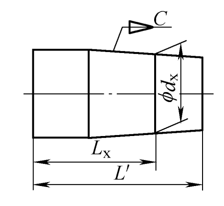


图 7-13 圆锥符号配置在基准线上







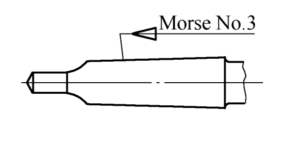


图 7-14 锥度的标注

7.3.2 圆锥的公差标注

标注圆锥公差的方法一般有三种：面轮廓度法、基本锥度法和公差锥度法。GB/T 15754—1995 规定：通常，应按面轮廓度法标注圆锥公差；有配合要求的结构型内、外圆锥，也可采用基本锥度法标注；当无配合要求时，可采用公差锥度法标注。

1. 面轮廓度法标注

面轮廓度法是给出圆锥的理论正确圆锥角 α（或锥度 C）、理论正确圆锥直径（D 或 d）或圆锥长度 L，标注面轮廓度公差，如图 7-15 所示。

图 7-15 给定圆锥角的面轮廓度法

2. 基本锥度法标注

基本圆锥法是表示圆锥要素尺寸与其几何特征具有相互从属关系的一种公差带的标注方法，即由两个同轴圆锥面（圆锥要素的最大实体尺寸和最小实体尺寸）形成两个具有理想形状的包容面公差

带，如图 7-16 所示。

3. 公差锥度法标注

公差锥度法是直接给定有关圆锥要素的公差，即同时给出圆锥直径公差和圆锥角公差，不构成两同轴圆锥面公差带的标注方法，如图 7-17 所示。

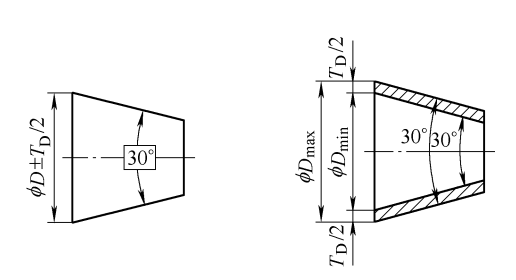


图 7-16　给定圆锥直径公差的基本锥度法

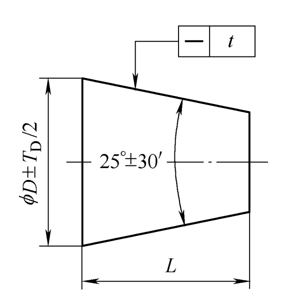


图 7-17　公差锥度法

7.4　圆锥的检测

1. 量规检验法

在大批量生产条件下，圆锥的检验多用圆锥量规。

圆锥量规用来检验实际内、外圆锥工件的锥度和直径偏差。检验内圆锥用圆锥塞规，检验外圆锥用圆锥环规。圆锥量规的规格尺寸和量规公差，在 GB/T 11852—2003《圆锥量规公差与技术条件》中有详细规定，可供选用，这里不做介绍。

圆锥配合中，一般对锥度要求比对直径要求严，所以用圆锥量规检验工件时，首先应采用涂色研合法检验工件锥度。用涂色研合法检验锥度时，先在量规圆锥面的素线全长上涂 3～4 条极薄的显示剂，然后把量规与被测圆锥对研（来回转角应小于 180°）。根据被测圆锥上的着色或量规上擦掉的痕迹，来判断被测锥度或圆锥角是否合格。

圆锥量规还可用来检验被测圆锥直径偏差。在量规的基面端刻有距离为 Z 的两条刻线（塞规）或小台阶（套规），Z 是根据工件圆锥直径公差按其锥度计算出的允许的轴向偏移量（mm），即

$$Z = T_D / C \times 10^3$$

式中，T_D 为圆锥直径公差（μm）；C 为工件的锥度（mm）。

若被测圆锥的基面端位于量规的两刻线或台阶的两端面之间，则表示直径合格。

2. 间接测量法

平台测量是用平板、量块、正弦尺、指示表和滚柱（或钢球）等常用计量器

具组合进行测量。这种测量方法的特点是测量与被测角度有关的线值尺寸，通过三角函数计算出被测角度值。

自测习题七

1. 圆锥配合与圆柱配合相比有何特点？试举几个具体实例加以说明。

2. 确定圆锥公差的方法有哪几种？有何区别？

3. 结构型圆锥配合与位移型圆锥配合有何区别？各适用于何种场合？

4. 设有一外圆锥，圆锥最大直径为100mm，圆锥最小直径为80mm，圆锥长度为100mm，试求圆锥角、圆锥素线角和圆锥锥度。

第8章　滚动轴承的互换性

8.1　滚动轴承的公差

8.1.1　概述

滚动轴承是机械中广泛应用的通用性较强的标准件。它与滑动轴承相比具有功率消耗小、摩擦力小、起动容易和更换简易方便等众多优点。它主要由内圈、外圈、滚动体和保持架组成，如图 8-1 所示。

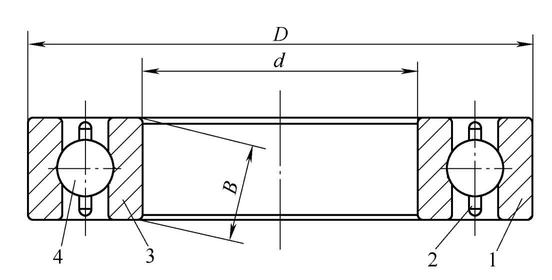


图 8-1　轴承结构示意图

1—外圈　2—保持架　3—内圈　4—滚动体

滚动轴承的外径（D）是与壳体孔配合的尺寸，而轴承内径（d）是与轴颈配合的尺寸。滚动轴承与壳体孔及轴颈的配合属于光滑圆柱体配合，其互换性为完全互换；而滚动轴承内、外圈滚道与滚动体的装配通常选用分组装配，其互换性为不完全互换。

8.1.2　滚动轴承的分类

1）按照滚动体的形状不同，滚动轴承可分为球轴承和滚子轴承。其中滚子轴承又可分为圆柱滚子轴承、球面滚子轴承和滚针轴承等，如图 8-2 所示。

2）按照滚动轴承所能承受的载荷不同，可分为：

① 向心轴承：只能承载径向载荷，如图 8-3a 所示。

② 推力轴承：主要承载轴向载荷，如图 8-3b 所示。推力轴承中与轴紧套在一起的零件称为轴圈，与机座安装在一起的称为座圈。

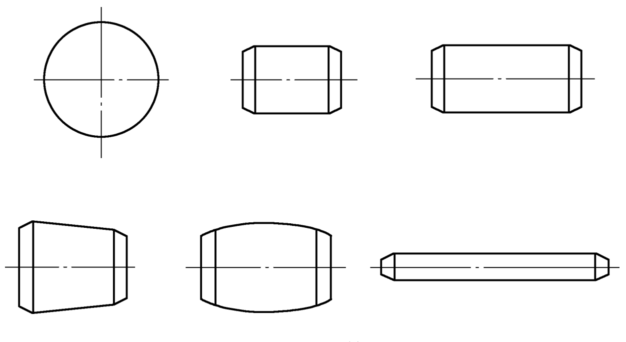


图 8-2　滚动体形状

③ 向心推力轴承（角接触球轴承）：既能承载径向载荷，又能承载轴向载荷，如图 8-3c 所示。这种轴承的滚动体与外圈滚道接触点（线）处的法线 n-n 与半径方向的夹角叫作接触角 α，α 越大，承载轴向载荷的能力就越大。

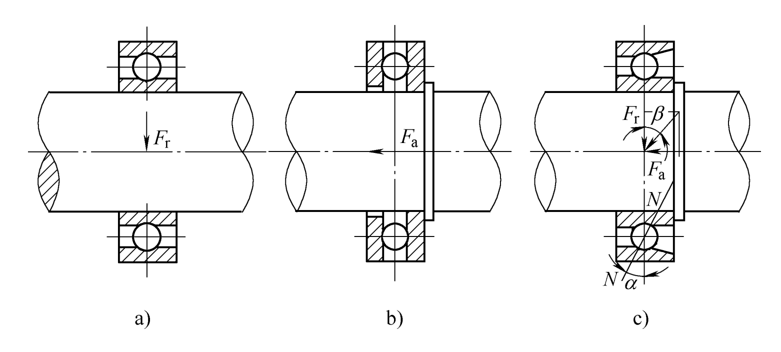


图 8-3　不同类型的轴承的承载情况

3）按照滚动轴承能否自动调心，可分为调心轴承和非调心轴承。

4）按照滚动体的列数，可分为单列滚动轴承、双列滚动轴承和多列滚动轴承。

滚动轴承类型代号表达见表 8-1。

表 8-1　常用滚动轴承类型代号及性能

代　　号	类型名称	性能及应用说明
10000	调心球轴承	外圈滚道为内球面形，具有自动调心的性能。可以自动补偿由于轴的挠曲和壳体变形产生的同轴度误差，适用于轴承座孔不能保证严格同轴度的部件 主要承受径向载荷，能承受少量的轴向载荷，不宜承受纯轴向载荷，极限转速高
20000	调心滚子轴承	具有两列滚子，主要用于承受径向载荷，同时也能承受任一方向的轴向载荷。具有较高的径向载荷承载能力，特别适用于重载或振动载荷下工作，但不能承受纯轴向载荷。调心性能良好，能补偿同轴度误差

（续）

代　　号	类型名称	性能及应用说明
30000	圆锥滚子轴承	主要适用于以径向载荷为主的径向与轴向联合载荷，大锥角圆锥滚子轴承可以用于承受以轴向载荷为主的径、轴向联合载荷。此种轴承为分离型轴承，其内圈和外圈可以分别安装。能够限制轴或外壳一个方向的位移。在径向载荷作用下会产生附加轴向力，因此，一般成对使用
51000/52000	推力球轴承	分离型轴承，接触角为90°，只能承受轴向载荷，极限转速低。单向推力球轴承只能承受一个方向的轴向载荷，可以限制轴和外壳一个方向的轴向位移；双向推力球轴承可以承受两个方向的轴向载荷，可以限制轴和外壳两个方向的轴向位移
60000	深沟球轴承	结构简单，使用方便，是生产批量最大、应用最广泛的一类轴承。主要用于承受径向载荷，也可以承受一定的轴向载荷。当轴承的径向间隙加大时，具有角接触球轴承的功能，可承受较大的轴向载荷。此类轴承摩擦系数小，极限转速高。在转速较高不宜采用推力球轴承的情况下可用该类轴承承受纯轴向载荷
70000C/AC/B	角接触球轴承	极限转速较高，可以同时承受径向载荷和轴向载荷，也可以承受纯轴向载荷，其轴向载荷承受能力由轴承接触角决定，并随接触角增大而增大 单列角接触球轴承只能承受一个方向的轴向力，在承受径向载荷时，会产生附加轴向力，必须施加相应的反轴向载荷，因此该种轴承一般成对使用

8.1.3　滚动轴承的精度等级及应用

1. 滚动轴承的精度等级

国家标准规定的滚动轴承的精度等级是按照其外形基本尺寸公差和旋转精度划分的。其中滚动轴承的外形尺寸公差是指轴承外径（D）、内径（d）、宽度（B）和圆锥滚柱轴承的装配高度（T）的尺寸公差，滚动轴承的旋转精度是指成套轴承内圈的径向跳动 K_{ia}、内圈基准端面对内孔的跳动 S_d、成套轴承内圈端面对滚道的跳动 S_{ia} 以及成套轴承外圈的径向跳动 K_{ea}、外径表面母线对基准端面的倾斜度变动量 S_D、外径表面母线对凸缘背面的倾斜度变动量 S_{D1}、成套轴承外圈端面对滚道的跳动 S_{ea}、成套轴承凸缘背面对滚道的跳动 S_{ea1}。在国家标准 GB/T 307.3—1996《滚动轴承通用技术规则》中，对滚动轴承内、外圈相配合的轴和壳体孔的公差带、几何公差及表面粗糙度等都有规定。

国家标准规定：向心球轴承分为 0、6、5、4 和 2 共五级，其中，0 级精度最低，2 级精度最高；圆锥滚子轴承的公差等级分为 0、6X、5 和 4 共四级，其中，0 级精度最低，4 级精度最高。仅仅向心轴承有 2 级，而其他类型的轴承则无 2 级。圆锥滚子轴承有 6X 级，而无 6 级。6X 级轴承与 6 级轴承的内径公差、外径公差和径向跳动公差均相同，区别在于 6X 级装配宽度要求比较严格。

2. 滚动轴承的精度等级应用

0 级轴承通常称为普通级轴承，应用在中等载荷、中等转速和对旋转精度要求不高的一般机械中，如普通电机、水泵、压缩机、汽车、拖拉机的变速机构，普通车床的变速、进给机构，汽轮机的旋转机构等。

6（6X）级轴承应用于旋转精度和转速较高的旋转机构中，如普通机床的主轴轴承、精密机床传动轴所用的轴承等。

5、4 级轴承应用于旋转精度高的机构中，如精密机床的主轴轴承、精密仪器中所用轴承等。

2 级轴承应用于旋转精度和转速均很高的旋转机构中，如精密坐标镗床的主轴轴承、高精度仪器和高转速机构中使用的轴承。

机床主轴轴承等级选用见表 8-2。

表 8-2 机床主轴轴承公差等级

轴承类型	公差等级	应用情况
深沟球轴承	4	磨齿床、插齿刀磨床、高精度磨床、螺纹磨床、丝锥磨床
角接触球轴承	5	齿轮加工机床、精密镗床、内圆磨床
	6	铣床、卧式车床
单列圆锥滚子轴承	4	高精度车床、精密丝杠车床、高精度外圆磨床
	5	镗床、精密车床、精密磨床、普通外圆磨床、转塔车床、多轴车床
	6	铣床、卧式车床、立式车床、自动车床
向心短圆柱滚子轴承、调心滚子轴承	6	精密车床及铣床的后轴承
圆锥滚子轴承	4	磨齿机
	5	精密车床、镗床、精密铣床、滚齿机、精密转塔车床
	6X	铣床、车床
推力球轴承	6	一般精度车床

8.1.4 滚动轴承的公差带及其特点

1. 滚动轴承的公差带

通常情况下，轴承内圈与轴应为同轴转动。为了防止内圈和轴颈在转动时产

生相对滑动而加剧轴承的磨损，要求内圈和其配合的轴颈之间具有一定的过盈量，但是由于内圈是薄壁零件，过盈量不能太大。轴承外圈装在壳体孔内，通常不旋转。工作时温度升高会使轴膨胀，两端轴承中应有一端是游动支承，因此可以把轴承外圈与壳体孔的配合稍微松一点，使之能补偿轴的热胀伸长。因为滚动轴承的内、外圈都是薄壁零件，所以在制造和自由状态下容易产生变形，但是在装配后又得到矫正。于是，国家标准不仅规定了轴承外圈直径（D）和内圈直径（d）的尺寸公差，还规定了两种形状公差。

两种尺寸公差是：①轴承单一内径 d_s 与单一外径 D_s 的极限偏差 Δd_s 和 ΔD_s；②轴承单一平面平均内径 d_{mp} 与单一平面平均外径 D_{mp} 的极限偏差 Δd_{mp} 和 ΔD_{mp}。

两种形状公差是：①轴承单一径向平面内，内径 d_s 与外径 D_s 的允许变动量 V_{dp} 和 V_{Dp}；②轴承不同径向平面间平均内径与平均外径的允许变动量 V_{dmp} 和 V_{Dmp}。

滚动轴承 0 级到 2 级精度的平均直径公差值相当于 IT7 ~ IT3 的标准公差值。向心轴承内、外圈直径尺寸公差和形状公差及旋转精度分别见表 8-3 和表 8-4。

表 8-3　向心轴承内圈公差　（单位：μm）

d/mm		精度等级	Δd_{mp}		Δd_s ②		V_{dp} ① 直径系列			V_{dmp}	K_{ia}	S_d	S_{ia} ③
							9	0，1	2，3，4				
超过	到		上极限偏差	下极限偏差	上极限偏差	下极限偏差	max			max	max	max	max
18	30	0	0	−10	—	—	13	10	8	8	13	—	—
		6	0	−8	—	—	10	8	6	6	8	—	—
		5	0	−6	—	—	6	5	5	3	4	8	8
		4	0	−5	0	−5	5	4	4	2.5	3	4	4
		2	0	−2.5	0	−2.5	3	2.5	2.5	1.5	2.5	1.5	2.5
30	50	0	0	−12	—	—	15	12	9	9	15	—	—
		6	0	−10	—	—	13	10	8	8	10	—	—
		5	0	−8	—	—	8	6	6	4	5	8	8
		4	0	−6	0	−6	6	5	5	3	4	4	4
		2	0	−2.5	0	−2.5	3	2.5	2.5	1.5	2.5	1.5	1.5

① 直径系列 7、8 级无规定值。
② Δd_s 中 4 级公差仅适用于直径系列 0、1、2、3 和 4。
③ 仅适用于沟型轴承。

表 8-4 向心轴承外圈公差 （单位：μm）

D/mm		精度等级	ΔD_{mp}		ΔD_s①		V_{Dp}② 直径系列			V_{Dmp}	K_{ea}	S_D	S_{ea}③
							9	0，1	2，3，4				
超过	到		上极限偏差	下极限偏差	上极限偏差	下极限偏差	max			max	max	max	max
50	80	0	0	-13	—④	—	16	13	10	10	25	—	—
		6	0	-11	—	—	14	11	8	8	13	—	—
		5	0	-9	—	—	9	7	7	5	8	8	10
		4	0	-7	0	-7	7	5	5	3.5	5	4	5
		2	0	-4	0	-4	4	4	4	2	4	1.5	4
80	120	0	0	-15	—	—	19	11	11	11	35	—	—
		6	0	-13	—	—	16	10	10	10	18	—	—
		5	0	-10	—	—	10	8	8	5	10	9	11
		4	0	-3	0	-8	8	6	6	4	6	5	6
		2	0	-8	0	-5	5	5	5	2.5	5	2.5	5

① 仅适用于4、2级轴承直径系列0，1，2，3及4。
② 对0、6级轴承，用于内、外止动环安装前或拆卸后，直径系列7和8无规定值。
③ 仅适用于沟型轴承。
④ 表中“—”表示未规定公差值。

2. 滚动轴承公差带特点

由于滚动轴承是标准件，已知其外径（D）和内径（d），所以通常内圈与轴颈的配合采用基孔制，外圈与壳体孔的配合采用基轴制。图8-4为滚动轴承内、外径的公差带图。根据国家规定，各级轴承单一径向平面平均内径、外径的公差带均采用单向配置，即上极限偏差为零，下极限偏差为负值。显然，各级轴承平均外径 D_{mp} 的公差带的上极限偏差也为零，与一般基轴制的定义是一致的；而平均内径 d_{mp} 的公差带，其上极限偏差也为零，与基孔制的定义相违背。公差带中产生过盈配合的主要目的是防止内圈与轴颈之间产生相对滑动而加剧轴承内圈的磨损，但是过盈量不宜过大。为了避免产生较大过

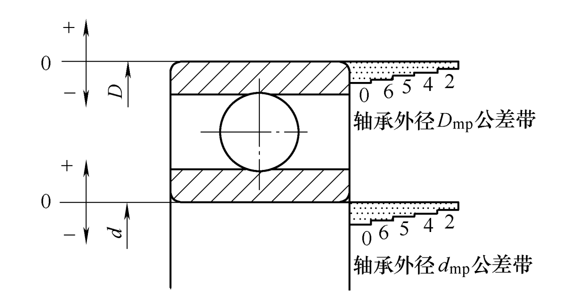


图8-4 滚动轴内、外径的公差带图

盈量，内圈和轴颈公差带通常选用基孔制的过渡配合。外圈和壳体孔配合通常不需要太紧，公差带选用一般基轴制的配合。

8.2 滚动轴承配合的选择

由于轴承为标准部件，因此，轴承内圈与轴颈的配合为基孔制，轴承外圈与外壳孔的配合为基轴制。由于轴承内圈内径公差带与基准孔（H）公差带的位置不同，因此，轴承与轴颈配合性质不同于光滑圆柱结合中的基孔制配合。

8.2.1 滚动轴承配合件的公差带

正确地选择与轴承配合的轴颈和外壳孔径公差带，对于保证滚动轴承的正常运转及旋转精度，延长其使用寿命至关重要。滚动轴承配合的国家标准规定了与轴承内、外圈配合的轴颈和外壳孔的尺寸公差带、几何公差以及配合选择的基本原则和要求。

依据基准制选择基本原则，由于滚动轴承为标准件，所以滚动轴承内圈与轴颈配合时应选取基孔制的配合，而滚动轴承外圈与外壳孔配合时应选取基轴制的配合。因此，与滚动轴承配合的轴颈和外壳孔的基本偏差代号可根据光滑圆柱体的国家标准中的基本偏差代号进行选择。特别强调一下，可根据所选用轴承应用间隙量或过盈量大小的不同进行不同基本偏差代号的选择，如图 8-5 所示。滚动轴承的国标中推荐了与各级精度相配合的轴颈和壳体孔的公差带，见表 8-5。

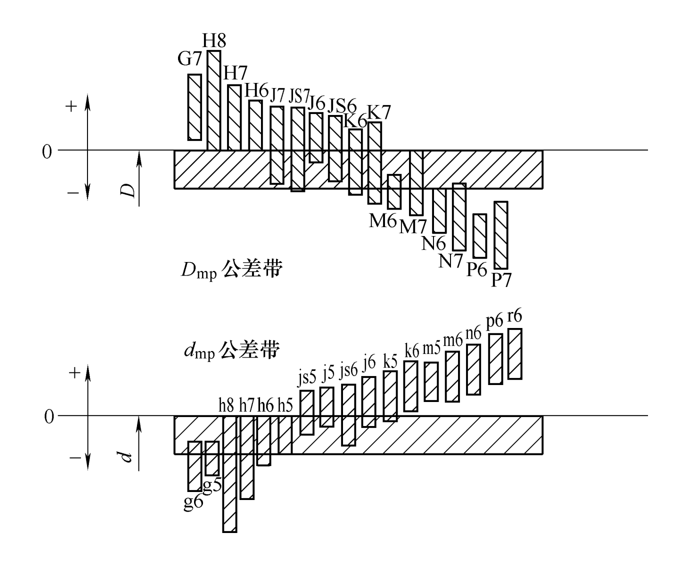


图 8-5 滚动轴承与轴和壳体孔的公差与配合

表 8-5 与滚动轴承各级精度相配合的轴颈和壳体孔公差带

轴承精度	轴公差带		壳体孔公差带		
	过渡配合	过盈配合	间隙配合	过渡配合	过盈配合
0	h9 h8 g6 h6 j6 js6 g5 h5 j5	r7 k6 m6 n6 p6 r6 k5 m5	H8 G7 H7 H6	J7 JS7 K7 M7 N7 J6 JS6 K6 M6 N6	P7 P6
6	g6 h6 j6 js6 g5 h5 j5	r7 k6 m6 n6 p6 r6 k5 m5	H8 G7 H7 H6	J7 JS7 K7 M7 N7 J6 JS6 K6 M6 N6	P7 P6
5	h5 j5 js5	k6 m6 k5 m5	G6 H6	JS6 K6 M6 JS5 K5 M5	
4	h5 js5 h4 js4	k5 m5 k4	H5	K6 JS5 K5 M5	

注：1. 孔 N6 与 0 级精度轴承（外径 $D<150$mm）和 6 级精度轴承（外径 $D<315$mm）的配合为过盈配合。

2. 轴 r6 用于内径 $d>125\sim150$mm；轴 r7 用于内径 $d>180\sim500$mm。

8.2.2 滚动轴承配合件的公差带选择

选择与轴承配合的轴颈和外壳孔径公差带时，主要考虑以下因素：内、外圈的工作条件（承受载荷的类型、载荷的大小）、轴承的类型、轴承的公称尺寸大小、轴承的公差等级、轴承轴向位移的限度及其他情况等。

1. 载荷类型

载荷类型指轴承套圈（内圈或外圈）承受载荷的形式，它分为局部载荷、循环载荷、摆动载荷。

（1）局部载荷　当套圈与作用在套圈上的径向载荷相对静止时，则套圈始终是局部承受载荷，这种载荷称为局部载荷。如图 8-6a 所示静止的外圈和图 8-6b 所示静止的内圈皆受到方向始终不变的径向力 F_r（如齿轮传动力、传动带作用力、车削时的径向切削力等）的作用，则图 8-6a 所示的外圈和图 8-6b 所示的内圈相对径向载荷静止，故承受局部载荷。局部载荷的特点是只有套圈的局部滚道始终受到载荷作用。

（2）循环载荷　当套圈与作用在套圈上的径向载荷相对转动，则套圈在 360°方向上依次承受载荷，称套圈承受循环载荷。如图 8-6a 所示旋转的内圈和图 8-6b 所示旋转的外圈皆受到方向始终不变的径向力 F_r 的作用，则它们的套圈相对载荷方向旋转，称为循环载荷。循环载荷的特点是套圈的整个圆周滚道依次受到载荷的作用。

（3）摆动载荷　当套圈在小于 360°方向的范围内依次承受径向载荷时，则套

圈承受摆动的径向载荷。摆动载荷的特点是套圈的部分滚道轮流受到变动载荷的作用，如图 8-6c 和 d 所示。

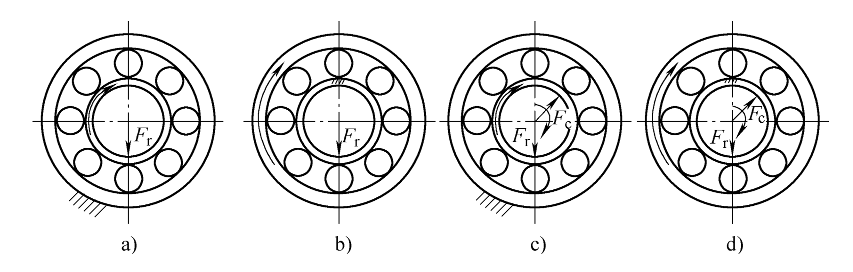


图 8-6 轴承套圈相当于载荷方向运动状态

2. 载荷大小

载荷大小有轻、正常和重 3 种类型。根据当量径向动载荷 P 与轴承中规定的动载荷 C 的比值大小进行分类，见表 8-6。

表 8-6 滚动轴承的载荷分类

P_r	球轴承	滚子轴承（圆锥滚子轴承除外）	圆锥滚子轴承
轻载荷	$P_r \leqslant 0.07C_r$	$P_r \leqslant 0.08C_r$	$P_r \leqslant 0.13C_r$
正常载荷	$0.07C_r < P_r \leqslant 0.15C_r$	$0.08C_r < P_r \leqslant 0.18C_r$	$0.13C_r < P_r \leqslant 0.26C_r$
重载荷	$P_r > 0.15C_r$	$P_r > 0.18C_r$	$P_r > 0.26C_r$

滚动轴承套圈与轴颈或壳体孔配合的最小过盈取决于载荷的大小。承受较轻的载荷时，可选用较小的过盈配合；承受较重的载荷或冲击载荷时，会使滚动轴承有较大的变形，导致接触面间实际过盈量减小和轴承内部的实际间隙量增大，因此此时为了使轴承正常运转，应选用较大的过盈配合。

3. 径向游隙

GB/T 46041—2012 规定了向心轴承的径向游隙，按其由小到大可分为 2 组、N 组、3 组、4 组、5 组。其中，N 组为基本组，市场上的轴承商品基本属于基本组。游隙大小将影响轴承的旋转精度、寿命和传动平稳性。径向游隙过大会引起轴较大的径向跳动和轴向窜动，使轴承产生较大的振动和噪声。径向游隙过小会增加轴承摩擦发热，降低轴承寿命，功率损失大。对于基本组游隙的轴承，配合的过盈量应适中；对于游隙比基本组大的轴承，配合的过盈量应较大；对游隙比基本组小的轴承，配合过盈量应较小。基本组轴承内、外圈一个选用过渡配合，另一个选用间隙配合。

4. 旋转精度

对于载荷较大且有较高旋转精度要求的轴承，为了消除弹性变形和振动的影响，应避免采用间隙配合；对于精密机床的轻载荷轴承，为避免孔和轴的几何误差对轴承精度的影响，常采用较小的间隙配合。

5. 轴颈和外壳孔的几何公差与表面粗糙度的选择

轴颈和外壳孔的几何公差与表面粗糙度可参照表 8-7 和表 8-8 选择。同样，为了防止套圈装配后产生变形，对轴颈和外壳孔规定更严格的圆柱度公差；轴肩和外壳孔肩端面规定端面圆跳动公差。

6. 其他因素

（1）温度　因轴承摩擦发热和其他热源的影响而使轴承套圈的温度高于配件的温度时，内圈轴颈的配合将会变松，外壳孔的配合将会变紧。当轴承工作温度高于 100℃时，应对所选用的配合做适当的修正（减小外圈与外壳孔的过盈，增加内圈与轴颈的过盈）。

（2）转速　对于转速高又承受冲击动载荷作用的滚动轴承，轴承与轴颈、外壳孔的配合应选用过盈配合。

（3）轴承尺寸大小　滚动轴承的尺寸越大，选取的配合应该越紧。但对于重型机械上使用的特别大尺寸的轴承，为了便于安装拆卸，应该选取较松的配合。

（4）公差等级　选择轴和外壳孔的尺寸公差等级时应与轴承的公差等级协调。

（5）公差的选择原则　轴颈和外壳孔分别与轴承内、外圈配合，由于内、外圈是薄壁套类零件，其径向刚性较差，易受径向载荷而产生变形，最终影响轴承的旋转精度。因此，轴颈和外壳孔应采用包容要求。

表 8-7　轴和外壳孔的几何公差

公称尺寸/mm		圆柱度 t				端面圆跳动 t_1			
		轴颈		外壳孔		轴肩		外壳轴肩	
		轴承公差等级							
		0	6（6X）	0	6（6X）	0	6（6X）	0	6（6X）
超过	到	公差值/μm							
—	6	2.5	1.5	4	2.5	5	3	8	5
6	10	2.5	1.5	4	2.5	6	4	10	6
10	18	3.0	2.0	5	3.0	8	5	12	8
18	30	4.0	2.5	6	4.0	10	6	15	10
30	50	4.0	2.5	7	4.0	12	8	20	12
50	80	5.0	3.0	8	5.0	15	10	25	15
80	120	6.0	4.0	10	6.0	15	10	25	15
120	180	8.0	5.0	12	8.0	20	12	30	20
180	250	10.0	7.0	14	10.0	20	12	30	20
250	315	12.0	8.0	16	12.0	25	15	40	25
315	400	13.0	9.0	18	13.0	25	15	40	25
400	500	15.0	10.0	20	15.0	25	15	40	25

滚动轴承与轴颈和壳体孔配合，公差带常用类比法选取。选取依据为表 8-6 ~ 表 8-12。

表 8-8 配合面的表面粗糙度

轴或轴承座直径/mm		轴或外壳配合表面直径公差等级								
		IT7			IT6			IT5		
		表面粗糙度/μm								
超过	到	*Rz*	*Ra*		*Rz*	*Ra*		*Rz*	*Ra*	
			磨	车		磨	车		磨	车
—	80	10	1.6	3.2	6.3	0.8	1.6	4	0.4	0.8
80	500	16	1.6	3.2	10	1.6	3.2	6.3	0.8	1.6
端面		25	3.2	6.3	25	3.2	6.3	10	1.6	3.2

表 8-9 向心轴承和轴的配合——轴公差带

圆柱孔轴承						
载荷情况		举例	深沟球轴承、调心球轴承和角接触球轴承	圆柱滚子轴承和圆锥滚子轴承	调心滚子轴承	公差带
			轴承公称内径/mm			
内圈承受旋转载荷或方向不定载荷	轻载荷	输送机、轻载齿轮箱	≤18 >18 ~ 100 >100 ~ 200 —	— ≤40 >40 ~ 140 >140 ~ 200	— ≤40 >40 ~ 100 >100 ~ 200	h5 j6① k6① m6①
	正常载荷	一般通用机械、电动机、泵、内燃机、正齿轮传动装置	≤18 >18 ~ 100 >100 ~ 140 >140 ~ 200 >200 ~ 280 — —	— ≤40 >40 ~ 100 >100 ~ 140 >140 ~ 200 >200 ~ 400 —	— ≤40 >40 ~ 65 >65 ~ 100 >100 ~ 140 >140 ~ 280 >280 ~ 500	j5、js5 k5② m5② m6 n6 p6 r6
	重载荷	铁路机车车辆轴箱、牵引电动机、破碎机等	—	>50 ~ 140 >140 ~ 200 >200 —	>50 ~ 100 >100 ~ 140 >140 ~ 200 >200	n6③ p6③ r6③ r7③

（续）

<table>
<tr><th colspan="7">圆柱孔轴承</th></tr>
<tr><th colspan="3" rowspan="2">载荷情况</th><th rowspan="2">举例</th><th>深沟球轴承、调心球轴承和角接触球轴承</th><th>圆柱滚子轴承和圆锥滚子轴承</th><th>调心滚子轴承</th><th>公差带</th></tr>
<tr><th colspan="4">轴承公称内径/mm</th></tr>
<tr><td rowspan="2">内圈承受固定载荷</td><td rowspan="2">所有载荷</td><td>内圈需在轴向易移动</td><td>非旋转轴上的各种轮子</td><td colspan="3" rowspan="2">所有尺寸</td><td>f6
g6</td></tr>
<tr><td>内圈不需在轴向易移动</td><td>张紧轮、绳轮</td><td>h6
j6</td></tr>
<tr><td colspan="3">仅有轴向负荷</td><td colspan="4">所有尺寸</td><td>j6、js6</td></tr>
<tr><th colspan="8">圆锥孔轴承</th></tr>
<tr><td rowspan="2">所有载荷</td><td>铁路机车车辆轴箱</td><td>装在退卸套上</td><td>所有尺寸</td><td colspan="4">h8（IT6）④、⑤</td></tr>
<tr><td>一般机械传动</td><td>装在紧定套上</td><td>所有尺寸</td><td colspan="4">h9（IT7）④、⑤</td></tr>
</table>

① 凡精度要求较高的场合，应用 j5、k5、m5 代替 j6、k6、m6。
② 圆锥滚子轴承、角接触球轴承配合对游隙影响不大，可用 k6、m6 代替 k5、m5。
③ 重载荷下轴承游隙应选大于 N 组。
④ 凡精度要求较高或转速要求较高的场合，应选用 h7（IT5）代替 h8（IT6）等。
⑤ IT6、IT7 表示圆柱度公差数值。

表 8-10　向心轴承和轴承座孔的配合——孔公差带

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2">载荷情况</th><th rowspan="2">举例</th><th rowspan="2">其他状况</th><th colspan="2">公差带①</th></tr>
<tr><th>球轴承</th><th>滚子轴承</th></tr>
<tr><td rowspan="2">外圈承受固定载荷</td><td>轻、正常、重</td><td rowspan="2">一般机械、铁路机车车辆轴箱</td><td>轴向易移动，可采用剖分式轴承座</td><td colspan="2">H7、G7②</td></tr>
<tr><td>冲击</td><td rowspan="2">轴向能移动，可采用整体或部分式轴承座</td><td colspan="2" rowspan="2">J7、JS7</td></tr>
<tr><td rowspan="3">方向不定载荷</td><td>轻、正常</td><td rowspan="2">电动机、泵、曲轴主轴承</td></tr>
<tr><td>正常、重</td><td rowspan="6">轴向不移动，采用整体式轴承座</td><td colspan="2">K7</td></tr>
<tr><td>重、冲击</td><td>牵引电动机</td><td colspan="2">M7</td></tr>
<tr><td rowspan="3">外圈承受旋转载荷</td><td>轻</td><td>皮带张紧轮</td><td>J7</td><td>K7</td></tr>
<tr><td>正常</td><td rowspan="2">轮毂轴承</td><td>M7</td><td>N7</td></tr>
<tr><td>重</td><td>—</td><td>N7、P7</td></tr>
</table>

① 并列公差带随尺寸的增大从左至右选择。对旋转精度有较高要求时，可相应提高一个公差等级。
② 不适用于剖分式轴承座。

表 8-11 推力轴承和轴的配合——轴公差带

载荷情况		轴承类型	轴承公称内径/mm	公差带
仅有轴向载荷		推力球和推力圆柱滚子轴承	所有尺寸	j6、js6
径向和轴向联合载荷	轴圈承受固定载荷	推力调心滚子轴承、推力角接触球轴承、推力圆锥滚子轴承	≤250 >250	j6 js6
	轴圈承受旋转载荷或方向不定载荷		≤200 >200～400 >400	k6① m6 n6

①要求较小过盈时，可分别用 j6、k6、m6 代替 k6、m6、n6。

表 8-12 推力轴承和轴承座孔的配合——孔公差带

载荷情况		轴承类型	公差带
仅有轴向载荷		推力球轴承	H8
		推力圆柱、圆锥滚子轴承	H7
		推力调心滚子轴承	—①
径向和轴向联合载荷	座圈承受固定载荷	推力角接触球轴承、推力调心滚子轴承、推力圆锥滚子轴承	H7
	座圈承受旋转载荷或方向不定载荷		K7② M7③

① 轴承座孔与座圈间间隙为 0.001D（D 为轴承公称外径）。
② 一般工作条件。
③ 有较大径向载荷时。

自测习题八

1. 滚动轴承由哪几部分组成？
2. 滚动轴承是如何进行分类的？
3. 滚动轴承按其尺寸公差和旋转精度可分几个公差等级？哪一级最高？哪一级最低？
4. 滚动轴承的公差带特点有哪些？
5. 滚动轴承径向载荷有哪几类？如何定义的？各自特点是什么？
6. 滚动轴承按载荷大小可分哪几类？分类依据是什么？

第9章　键与花键连接的互换性与检测

9.1　单键连接的互换性与检测

9.1.1　单键连接概述

1. 单键类型

按照单键结构形状不同可分为平键、半圆键、楔键和切向键四种。

（1）平键　平键按照用途不同，可分普通平键、导向平键和滑键。普通平键按其端部形状可分为圆头（A 型）、平头（B 型）和单圆头（C 型）。普通平键的上、下面和两个侧面都是相互平行的，主要靠键与键槽侧面的作用传递转矩，应用比较广泛。因此，本小节以普通平键展开讨论。

（2）半圆键　半圆键侧面是半圆形的，较适用于锥形轴与轮毂的连接。由于其要求轴上键槽深，对轴的强度削弱较大，所以主要用于轻载连接或作为锥形轴端的辅助连接。

（3）楔键　楔键按其端部形状可分普通楔键和钩头楔键。普通楔键又分为圆头和平头。主要适用于传递精度要求不高、低速轻载的连接场合。

（4）切向键　切向键是由一对斜度为 1∶100 的楔键组成的，主要应用于传递转矩较大的场合。

2. 普通平键的基本几何参数

普通平键几何参数主要由宽度（b）、高度（h）和长度（L）三部分组成。普通平键连接由轴、键和轮毂共三个零件组成，键的上表面与轮毂槽间要有一定的间隙，如图 9-1 所示。

9.1.2　普通平键的公差与配合

由于普通平键连接是通过键与键槽的侧面相互挤压来传递轴与轮毂之间的动力与转矩的，因此键与键槽宽度 b 是决定配合类别的主要参数，即配合尺寸。而键的高度 h 与键槽的深度（轴 t_1 和轮毂 t_2）是非配合尺寸。键属于标准件，所以键与键槽宽度配合采用基轴制，键宽公差带为 h8。

普通平键按照配合松紧程度可分为松连接、正常连接和紧密连接三种，主要

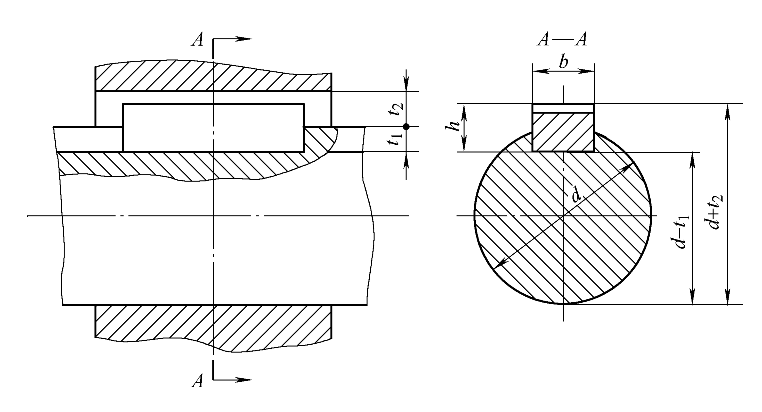


图 9-1　普通平键键槽的剖面图

是通过选取不同的轮毂槽宽的公差带来获得，见表 9-1。

表 9-1　平键连接的配合选用及应用

配合类别	尺寸 b 公差带			应用说明
	键	轴槽	轮毂槽	
松连接	h8	H9	D10	属于间隙配合，键在轴槽和轮毂槽中可滑动，适用于导向平键
正常连接		N9	JS9	键在轴槽和轮毂槽中都是固定的，适用于传递载荷不大的场合，在机械行业中广泛应用
紧密连接		P9	P9	键在轴槽和轮毂槽中都是固定的，比正常连接更紧，适用于传递重载荷、冲击载荷和双向传递转矩的场合

平键连接的非配合尺寸包括键的高度 h、轴槽深度 t_1 和轮毂深度 t_2、键长 L。键的高度 h，矩形键的公差带为 h11，方形键的公差带为 h8，键的长度 L 公差带为 h14，键槽的长度公差带为 H14。所有具体数值见表 9-2。

表 9-2　键槽尺寸公差　　（单位：μm）

宽度 b 公称尺寸/mm	键槽尺寸公差带					
	宽度 b					槽长 L
	松连接		正常连接		紧密连接	H14
	轴 H9	毂 D10	轴 N9	毂 JS9	轴与毂 P9	
≤3	+25 0	+60 +20	−4 −29	±12.5	−6 −31	
>3～6	+30 0	+78 +30	0 −29	±15	−12 −42	

（续）

<table>
<tr><th rowspan="4">宽度 b 公称尺寸/mm</th><th colspan="6">键槽尺寸公差带</th></tr>
<tr><th colspan="5">宽度 b</th><th>槽长 L</th></tr>
<tr><th colspan="2">松连接</th><th colspan="2">正常连接</th><th>紧密连接</th><th rowspan="2">H14</th></tr>
<tr><th>轴 H9</th><th>毂 D10</th><th>轴 N9</th><th>毂 JS9</th><th>轴与毂 P9</th></tr>
<tr><td>>6～10</td><td>+36
0</td><td>+98
+40</td><td>0
-36</td><td>±18</td><td>-15
-51</td><td>+360
0</td></tr>
<tr><td>>10～18</td><td>+43
0</td><td>+120
+50</td><td>0
-43</td><td>±21</td><td>-18
-61</td><td>+430
0</td></tr>
<tr><td>>18～30</td><td>+52
0</td><td>+149
+65</td><td>0
-52</td><td>±26</td><td>-22
-74</td><td>+520
0</td></tr>
<tr><td>>30～50</td><td>+62
0</td><td>+180
+80</td><td>0
-62</td><td>±31</td><td>-26
-88</td><td>+620
0</td></tr>
<tr><td>>50～80</td><td>+74
0</td><td>+220
+100</td><td>0
-74</td><td>±37</td><td>-32
-106</td><td>+740
0</td></tr>
<tr><td>>80～120</td><td>+87
0</td><td>+260
+120</td><td>0
-87</td><td>±43</td><td>-37
-124</td><td>+870
0</td></tr>
<tr><td>>120～180</td><td>+100
0</td><td>+305
+145</td><td>0
-100</td><td>±50</td><td>-43
-143</td><td>+1000
0</td></tr>
<tr><td>>180～250</td><td>+115
0</td><td>+355
+170</td><td>0
-115</td><td>±57</td><td>-50
-165</td><td>+1150
0</td></tr>
</table>

为保证键与键槽的侧面具有足够的接触面积和避免装配困难，限制键和键槽对孔的轴线的对称度公差，一般取7～9级。键槽侧面为工作配合面的表面粗糙度一般取 $Ra=1.6\sim3.2\mu m$，非配合面表面粗糙度一般取 $Ra=6.3\mu m$。

9.1.3 平键连接的检测

平键连接的检测比较简单，需要检测以下几个参数：键宽、轴槽和轮毂槽的宽度、深度以及对称度。

尺寸参数检测过程中，若为单件小批量生产，主要用游标卡尺、外径千分尺或内径千分尺测量其尺寸参数；若为大批量生产，主要用极限量规进行检测。

轴槽和轮毂槽的对称度检测中，若为单件小批量生产，可用分度头、V形块和百分表测量；若为大批量生产，通常用对称度量规检测。

9.2 花键连接的互换性及检测

9.2.1 花键连接概述

1. 花键的类型

花键分为矩形花键、渐开线花键和三角形花键。其中，矩形花键在机械行业中应用最广泛，因此，本小节以矩形花键展开讨论。

2. 花键的优点

1）传递转矩大，且定位精度高。

2）导向性好，灵活性好，强度高，连接可靠性高。

3. 花键参数

花键主要参数有小径（d）、大径（D）和键宽（B），如图 9-2 所示。为了便于加工和检测，通常取键数为偶数，有 6、8、10 三种。矩形花键按承载能力，可分为中、轻两个系列。其中，中系列的键高尺寸较大，适用于承载较大的场合，轻系列的键高尺寸较小，适用于承载略小的场合。矩形花键的尺寸系列见表 9-3，矩形花键的键槽尺寸系列见表 9-4。

表 9-3 矩形花键的尺寸系列 （单位：mm）

小径 d	轻系列				中系列			
	规格 $N\times d\times D\times B$	键数 N	大径 D	键宽 B	规格 $N\times d\times D\times B$	键数 N	大径 D	键宽 B
11					6×11×14×3	6	14	3
13					6×13×16×3.5		16	3.5
16					6×16×20×4		20	4
18					6×18×22×5		22	5
21					6×21×25×5		25	
23	6×23×26×6	6	26	6	6×23×28×6		28	6
26	6×26×30×6		30		6×26×32×6		32	
28	6×28×32×7		32	7	6×28×34×7		34	7
32	6×32×36×6		36	6	8×32×38×6	8	38	6
36	8×36×40×7	8	40	7	8×36×42×7		42	7
42	8×42×46×8		46	8	8×42×48×8		48	8
46	8×46×50×9		50	9	8×46×54×9		54	9
52	8×52×58×10		58	10	8×52×60×10		60	10
56	8×56×62×10		62		8×56×65×10		65	

（续）

<table>
<tr><th rowspan="2">小径 d</th><th colspan="4">轻系列</th><th colspan="4">中系列</th></tr>
<tr><th>规格
$N\times d\times D\times B$</th><th>键数
N</th><th>大径
D</th><th>键宽
B</th><th>规格
$N\times d\times D\times B$</th><th>键数
N</th><th>大径
D</th><th>键宽
B</th></tr>
<tr><td>62</td><td>8×62×68×12</td><td>8</td><td>68</td><td rowspan="3">12</td><td>8×62×72×12</td><td></td><td>72</td><td rowspan="3">12</td></tr>
<tr><td>72</td><td>10×72×78×12</td><td rowspan="5">10</td><td>78</td><td>10×72×82×12</td><td rowspan="5">10</td><td>82</td></tr>
<tr><td>82</td><td>10×82×88×12</td><td>88</td><td>10×82×92×12</td><td>92</td></tr>
<tr><td>92</td><td>10×92×98×14</td><td>98</td><td>14</td><td>10×92×102×14</td><td>102</td><td>14</td></tr>
<tr><td>102</td><td>10×102×108×16</td><td>108</td><td>16</td><td>10×102×112×16</td><td>112</td><td>16</td></tr>
<tr><td>112</td><td>10×112×120×18</td><td>120</td><td>18</td><td>10×112×125×18</td><td>125</td><td>18</td></tr>
</table>

表 9-4　矩形花键的键槽尺寸系列　　（单位：mm）

<table>
<tr><th colspan="5">轻系列</th><th colspan="5">中系列</th></tr>
<tr><th rowspan="2">规格
$N\times d\times D\times B$</th><th rowspan="2">$C$</th><th rowspan="2">$r$</th><th>$d_{1\min}$</th><th>$a_{\min}$</th><th rowspan="2">规格
$N\times d\times D\times B$</th><th rowspan="2">$C$</th><th rowspan="2">$r$</th><th>$d_{1\min}$</th><th>$a_{\min}$</th></tr>
<tr><th colspan="2">参考</th><th colspan="2">参考</th></tr>
<tr><td rowspan="5">—</td><td rowspan="5">—</td><td rowspan="5">—</td><td rowspan="5">—</td><td rowspan="5">—</td><td>6×11×14×3</td><td rowspan="2">0.2</td><td rowspan="2">0.1</td><td rowspan="2">—</td><td rowspan="2">—</td></tr>
<tr><td>6×13×16×3.5</td></tr>
<tr><td>6×16×20×4</td><td rowspan="4">0.3</td><td rowspan="4">0.2</td><td>14.4</td><td rowspan="2">1.0</td></tr>
<tr><td>6×18×22×5</td><td>16.6</td></tr>
<tr><td>6×21×25×5</td><td>19.5</td><td>2.0</td></tr>
<tr><td>6×23×26×6</td><td>0.2</td><td>0.1</td><td>22</td><td>3.5</td><td>6×23×28×6</td><td>21.2</td><td rowspan="2">1.2</td></tr>
<tr><td>6×26×30×6</td><td rowspan="6">0.3</td><td rowspan="6">0.2</td><td>24.5</td><td>3.8</td><td>6×26×32×6</td><td rowspan="5">0.4</td><td rowspan="5">0.3</td><td>23.6</td></tr>
<tr><td>6×28×32×7</td><td>26.6</td><td>4.0</td><td>6×28×34×7</td><td>25.8</td><td>1.4</td></tr>
<tr><td>8×32×36×6</td><td>30.3</td><td>2.7</td><td>8×32×38×6</td><td>29.4</td><td rowspan="2">1.0</td></tr>
<tr><td>8×36×40×7</td><td>34.4</td><td>3.5</td><td>8×36×42×7</td><td>33.4</td></tr>
<tr><td>8×42×46×8</td><td>40.5</td><td>5.0</td><td>8×42×48×8</td><td>39.4</td><td>2.5</td></tr>
<tr><td>8×46×50×9</td><td>44.6</td><td>5.7</td><td>8×46×54×9</td><td rowspan="3">0.5</td><td rowspan="3">0.4</td><td>42.6</td><td>1.4</td></tr>
<tr><td>8×52×58×10</td><td rowspan="7">0.4</td><td rowspan="7">0.3</td><td>49.6</td><td>4.8</td><td>8×52×60×10</td><td>48.6</td><td rowspan="2">2.5</td></tr>
<tr><td>8×56×62×10</td><td>53.5</td><td>6.5</td><td>8×56×65×10</td><td>52.0</td></tr>
<tr><td>8×62×68×12</td><td>59.7</td><td>7.3</td><td>8×62×72×12</td><td rowspan="6">0.6</td><td rowspan="6">0.5</td><td>57.7</td><td>2.4</td></tr>
<tr><td>10×72×78×12</td><td>69.6</td><td>5.4</td><td>1072×82×12</td><td>67.7</td><td>1.0</td></tr>
<tr><td>10×82×88×12</td><td>79.3</td><td>8.5</td><td>10×82×92×12</td><td>77.0</td><td>2.9</td></tr>
<tr><td>10×92×98×14</td><td>89.6</td><td>9.9</td><td>10×92×102×14</td><td>87.3</td><td>4.5</td></tr>
<tr><td>10×102×108×16</td><td>90.6</td><td>11.3</td><td>10×102×112×16</td><td>97.7</td><td>6.2</td></tr>
<tr><td>10×112×120×18</td><td>0.5</td><td>0.4</td><td>108.8</td><td>10.5</td><td>10×112×125×18</td><td>106.2</td><td>4.1</td></tr>
</table>

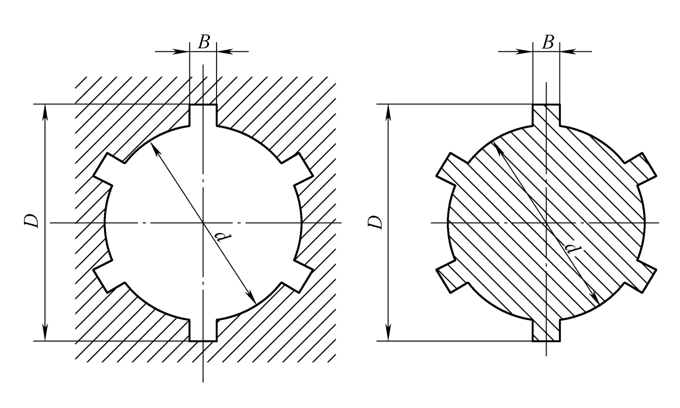


图 9-2 矩形花键主要尺寸

4. 花键定心方式

花键连接的定心方式有小径定心、大径定心和键侧（键槽侧）定心。国标中规定为小径定心，主要是因为小径定心的定心精度高，稳定性好，而且能用磨削的方法消除热处理变形，使定心直径尺寸、形状、位置获得更高的精度，有利于简化加工工艺，降低生产成本。尤其是对内花键定心表面的加工，采用磨削加工方法，可以减少成本较高的拉刀规格，也易于保证表面质量。采用小径定心与国际标准相符，便于进行国际交流与合作。

9.2.2 矩形花键的公差与配合

按照精度矩形花键分为一般用花键和精密传动用花键两大类。其中，每一类均由三种装配形式：滑动连接、紧滑动连接和固定连接。花键采用基孔制配合，公差带选用参照表 9-5。

表 9-5 内、外花键的尺寸公差带（摘自 GB/T 1144 — 2001）

内花键				外花键			装配形式
d	*D*	*B* 拉削后不热处理	*B* 拉削后热处理	*d*	*D*	*B*	
一般用							
H7	H10	H9	H11	f7	a11	d10	滑动
				g7		f9	紧滑动
				h7		h10	固定
精密传动用							
H5	H10	H 7、H9		f 5	a11	d8	滑动
				g5		f 7	紧滑动
				h5		h8	固定

（续）

内花键				外花键			装配形式
d	D	B		d	D	B	
		拉削后不热处理	拉削后热处理				
精密传动用							
H6	H10	H7、H9		f6	a11	d8	滑动
				g6		f7	紧滑动
				h6		h8	固定

注：1. 精密传动用的内花键，当需要控制键侧配合间隙时，槽宽可选 H7，一般情况下可选 H9。
2. d 为 H6 和 H7 的内花键，允许与提高一级的外花键配合。

9.2.3　矩形花键的几何公差和表面粗糙度

1. 矩形花键的几何公差

由于花键定心精度高，所以不仅对尺寸要求严格，对其几何公差也要严格要求。主要是位置度和对称度公差，公差值查表 9-6 和表 9-7。

表 9-6　矩形花键位置度公差值　（单位：mm）

键槽宽和键宽		3	3.5～6	7～10	12～18
		t_1			
键槽宽		0.010	0.015	0.020	0.025
键宽	滑动、固定	0.010	0.015	0.020	0.025
	紧滑动	0.006	0.010	0.013	0.016

表 9-7　矩形花键对称度公差值　（单位：mm）

键槽宽和键宽	3	3.5～6	7～10	12～18
	t_2			
一般用	0.010	0.012	0.015	0.018
精密传动用	0.006	0.008	0.009	0.011

2. 公差原则

1）要求小径 d 的极限尺寸遵循包容要求。

2）位置度公差满足最大实体要求。

3）对称度和等分度公差满足独立原则。

3. 矩形花键的表面粗糙度要求

小径定心时，有关加工表面粗糙度值推荐值见表 9-8。

表 9-8 矩形花键表面粗糙度值 （单位：μm）

加工表面	内花键	外花键
	Ra 不大于	
大径	6.3	3.2
小径	0.8	0.8
键侧	3.2	0.8

4. 矩形花键的标注

矩形花键的标记代号为 $N \times d \times D \times B$，即键数 × 小径（mm）× 大径（mm）× 键宽（mm）。有时将公差带代号标注在尺寸的后面。例如 8 × 36H7 × 30H10 × 7H11，8 × 36f 7 × 30a11 × 7d8。

9.2.4 矩形花键的检测

矩形花键的检测包括尺寸的检测和几何公差的检测两部分。单件小批量生产时，可通过千分尺、游标卡尺、指示表等通用计量器具测量花键的尺寸误差和几何误差。大批量生产时，可通过内、外花键综合塞（环）规，检测内（外）花键的小径、大径、各键槽宽（键宽）、大径对小径的同轴度和键（键槽）的位置度，但是只能检测其合格性。

自测习题九

1. 平键连接的配合采用何种基准制？花键连接采用何种基准制？

2. 矩形花键的主要参数有哪些？定心方式有哪几种？哪种方式是常用的？为什么？

3. 花键是如何标记的？具体含义是什么？

4. 有一齿轮与轴的连接用平键传递转矩。平键尺寸 $b = 10$mm，$L = 28$mm。齿轮与轴的配合为 ϕ35H7/h6，平键采用一般连接。试查出键槽尺寸偏差、几何公差和表面粗糙度，并分别标注在轴和齿轮的横剖面上。

第10章　普通螺纹连接的互换性与检测

10.1　概述

10.1.1　螺纹的分类及其应用

1）按其功用不同，可分为传动螺纹和紧密连接螺纹。

① 传动螺纹包含矩形螺纹、梯形螺纹和锯形齿螺纹，主要用于传递动力、运动或位移，如机床丝杠、螺旋压力机和起重机吊钩等。在使用过程中要求保证良好的润滑、运动精确可靠。

② 紧密连接螺纹包含管螺纹和普通螺纹。其中普通螺纹又包含粗牙和细牙两种。主要用于密封、紧固或连接零件。普通螺纹连接应用最广，一般多用粗牙螺纹，细牙螺纹多用于薄壁零件或受变载、振动及有冲击的场合。管螺纹用于密封连接，如管接口和阀门接口等。在应用过程中要考虑其应具有良好的密封性、旋合性和连接强度。

2）按螺纹形成面的不同，可分为内螺纹和外螺纹。常用于连接或传动。

3）按螺旋线的旋向不同，可分为左旋和右旋。

10.1.2　普通螺纹的基本牙型和主要几何参数

1. 普通螺纹的主要几何参数及表达符号

（1）基本大径（D 或 d）　是指与外螺纹的牙顶或与内螺纹的牙底相切的假想圆柱的直径。国家标准规定普通螺纹的大径为螺纹的公称直径。

（2）基本小径（D_1 或 d_1）　是指与外螺纹的牙底或与内螺纹的牙顶相切的假想圆柱的直径。

（3）基本中径（D_2 或 d_2）　是假想的一个圆柱直径，该圆柱轴向剖面内牙型上的沟槽和牙厚相等。

（4）单一中径（D_{2s}或 d_{2s}）　是指一个假想圆柱的直径，该圆柱的母线通过牙型上沟槽的宽度等于一半基本螺距的位置。若螺距无误差，则单一中径等于中径；若螺距存在误差，则单一中径与中径不等。

（5）牙型角（α）　是指轴向剖面内牙型两侧的夹角，通常情况下，普通螺纹

的牙型角等于 60°。

（6）牙型斜角（β） 是指轴向剖面内螺纹牙型侧边与轴线的垂线的夹角。

（7）牙型高度（H） 是指在螺纹牙型上牙顶与牙底之间在垂直于轴线方向上的距离。

（8）螺距（P） 是指相邻两个螺纹牙在中径线上平行侧面的轴向距离。

（9）导程（L） 是指在同一螺旋线上相邻的两个螺纹牙在中径线上平行侧面的轴向距离。若为单线螺纹，则 $L=P$；若为 n 线螺纹，则 $L=nP$。

（10）螺纹升角（γ） 在中径圆柱上螺旋线的切线与垂直于螺纹轴线的平面间的夹角，如图 10-1 所示，$\gamma=\arctan\dfrac{L}{\pi d_2}=\arctan\dfrac{nP}{\pi d_2}$。

（11）旋合长度 是指两个相配合的螺纹相互旋合部分，沿着螺纹轴向的长度。

2. 普通螺纹基本牙型和基本尺寸

（1）基本牙型 新标准 GB/T 192—2003 中规定了普通螺纹的基本牙型及其尺寸，详见图 10-1。

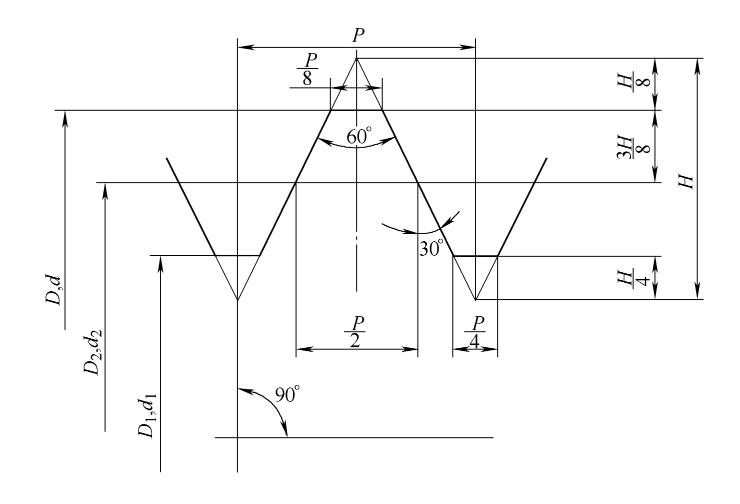


图 10-1 普通螺纹基本牙型

$H=\dfrac{\sqrt{3}}{2}P\approx 0.866025P$，$D_1=D-2\times\dfrac{5}{8}H$，$D_2=D-2\times\dfrac{3}{8}H$，$d_1=d-2\times\dfrac{5}{8}H$，$d_2=d-2\times\dfrac{3}{8}H$

（2）基本尺寸 由于螺纹属于标准件，因此在实际设计时，应选取其螺距、公称直径、中径和小径的标准值。详见表 10-1。

表 10-1 普通螺纹基本尺寸（摘自 GB/T 196、193—2003）（单位：mm）

公称直径 D、d		粗牙			细牙
第一系列	第二系列	螺距 P	中径 D_2、d_2	小径 D_1、d_1	螺距 P
8		1.25	7.188	6.647	1，0.75
10		1.5	9.026	8.376	1.25，1，0.75
12		1.75	10.863	10.106	1.5，1.25，1
	14	2	12.701	11.835	1.5，1，(1.25)
16		2.0	14.701	13.835	1.5，1
	18	2.5	16.376	15.294	2，1.5，1
20			18.376	17.294	
	22		20.376	19.294	
24		3	22.051	20.752	2，1.5，1
	27		25.051	23.752	
30		3.5	27.727	26.211	(3)，2，1.5，1

注：1. 优先选用第一系列，第三系列（本表未列出）一般不选用。
2. M14×1.25 仅用于火花塞。
3. 括号内尺寸尽量不选用。

10.1.3 螺纹几何参数对互换性的影响

由于螺纹通用性比较强，因此要使其具有互换性，即在应用过程中有良好的旋合性和连接的可靠性。能够影响其互换性的参数有大径、小径、中径、螺距和牙型半角。

1. 螺纹大径、小径偏差对螺纹互换性的影响

内、外螺纹加工后，外螺纹的大径和小径要分别小于内螺纹的大径和小径，才能保证良好的旋合性。若出现外螺纹的大径略大而内螺纹的小径略小，配合性质不改变，则会减小螺纹的接触面积，以至于影响螺纹连接的可靠性。

2. 螺纹中径偏差对互换性的影响

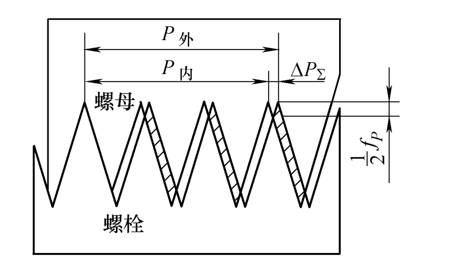
所谓中径偏差是指螺纹单一中径相对其基本中径的代数差。该误差在生产制造过程中是不可避免的，若只考虑中径误差，只有在外螺纹中径偏差小于内螺纹中径偏差时，才能保证螺纹连接良好的旋合性，相反则不能旋合。但若外螺纹中径过小，内螺纹中径过大，则会削弱螺纹连接的强度。因此，螺纹中径是影响螺纹旋合性的重要因素，必须控制其公差以保证旋合性。

3. 螺距误差对螺纹互换性的影响

螺距误差包含单个螺距误差和累积螺距误差两种。前者是指单个螺距的实际尺寸与基本螺距的代数差，与旋入长度无关，后者指在旋合长度上，跨 n 个牙型在中径线上沿着轴向距离的实际尺寸与公称尺寸的代数差，与旋入长度有关，如

图 10-2所示。在只考虑螺距误差时，跨 n 个牙型，若外螺纹螺距大于内螺纹，则无法旋合。解决无法旋合的方法就是使外螺纹的中径减小一个数值 f_P。由此可知，若内螺纹螺距存在误差，则应使内螺纹的中径增大一个数值 f_P。其中，f_P 称为螺纹螺距误差的中径当量。

对于牙型角为 60°的普通螺纹，$f_P = \Delta P_\Sigma \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 1.732 | \Delta P_\Sigma |$ 。



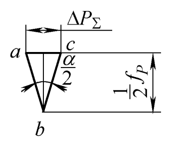


图 10-2　螺距累积误差

4. 牙型半角误差对螺纹互换性的影响

牙型半角误差是指牙型半角实际值与公称值的代数差，包括牙型角度误差和位置误差。其对旋合性和连接强度有影响，虽然很难检测每个牙型半角的误差，但可以选择合成中径当量，通过控制减小外螺纹中径或增大内螺纹中径来进行调节。

5. 螺纹作用中径及判断中径合格性原则

（1）螺纹作用中径（D_{2a}或 d_{2a}）　螺纹作用中径是指在规定的旋合长度内恰好包容实际螺纹线的一个假想螺纹的中径。该假想螺纹具有基本牙型的螺距、牙型半角和牙型高度，且在牙型的顶部和底部留有间隙以确保不与实际螺纹的大、小径发生干涉。

由于只有当外螺纹的中径小于内螺纹的中径时，才能够旋合。因此，当外螺纹有螺距误差和牙型半角误差时，在规定的旋合长度内，只能与一个中径较大的内螺纹旋合，这个假想的内螺纹中径称作外螺纹的作用中径。外螺纹中径等于外螺纹的实际中径与螺距误差及牙型半角误差的中径当量之和，即

$$d_{2a} = d_{2实} + (f_P + f_{\frac{\alpha}{2}})$$

而内螺纹的作用中径等于内螺纹的实际中径与螺距误差及牙型半角误差的中径当量之差，即

$$D_{2a} = D_{2实} - (f_P + f_{\frac{\alpha}{2}})$$

（2）判断中径合格性原则　普通螺纹没有规定螺距误差和牙型半角误差，而是规定了中径公差，用其控制中径本身误差、螺距误差和牙型半角误差的综合误差，使螺纹具有良好的旋入性和连接的可靠性。

判断螺纹中径合格性原则为泰勒原则。具体内容为：

① 对于外螺纹来说，作用中径不大于中径的极限最大尺寸，且实际中径不小于中径极限最小尺寸，即 $d_{2a} \leqslant d_{2max}$，$d_{2实} \geqslant d_{2min}$。

② 对于内螺纹来说，作用中径不小于中径的极限最小尺寸，且实际中径不大于中径的极限最大尺寸，即 $D_{2a} \geqslant D_{2max}$，$D_{2实} \leqslant D_{2min}$。

10.2 普通螺纹的公差与配合

10.2.1 普通螺纹的公差带

普通螺纹的公差带的组成和尺寸公差带的组成是一样的，都是由公差带的大小和位置两个因素组成，公差带的位置由基本偏差决定。

1. 公差等级中公差带的大小由公差等级决定

根据公差值的不同，螺纹的公差等级有若干个等级。其中，6 级为基本级，3 级精度最高，9 级精度最低。

2. 基本偏差

基本偏差是指公差带中靠近零线的那一个极限偏差。由公差带相对基本牙型的距离所决定。外螺纹以上偏差（es）为基本偏差，内螺纹以下偏差（EI）为基本偏差。外螺纹有 G 和 H 两个基本偏差代号，内螺纹有 e、f、g 和 h 四个基本偏差代号。其中 H 和 h 的基本偏差为零，G 的基本偏差为正值，e、f 和 g 的基本偏差为负值，如图 10-3、图 10-4 所示。

GB/T 197—2003 规定了螺纹的公差等级的选用以及极限偏差数值，详见表 10-2、表 10-3。

表 10-2 螺纹的极限偏差值表

基本大径/mm		螺距/mm	内螺纹/μm					外螺纹/μm					
			公差带	中径		小径		公差带	中径		小径		小径
>	≤			ES	EI	ES	EI		es	ei	es	ei	
5.6	11.2	0.75	—	—	—	—	—	3h4h	0	-50	0	-90	-108
			4H	+85	0	+118	0	4h	0	-63	0	-90	-108
			5G	+128	+22	+172	+22	5g6g	-22	-102	-22	-162	-130
			5H	+106	0	+150	0	5h4h	0	-80	0	-90	-108
			—	—	—	—	—	5h6h	0	-80	0	-140	-108
			—	—	—	—	—	6e	-56	-156	-56	-196	-164
			—	—	—	—	—	6f	-38	-138	-38	-178	-146
			6G	+154	+22	+212	+22	6g	-22	-122	-22	-162	-130
			6H	+132	0	+190	0	6h	0	-100	0	-140	-108
			—	—	—	—	—	7e6e	-56	-181	-56	-196	-164

（续）

基本大径/mm		螺距/mm	内螺纹/μm					外螺纹/μm					
			公差带	中径		小径		公差带	中径		小径		小径
>	≤			ES	EI	ES	EI		es	ei	es	ei	
5.6	11.2	0.75	7G	+192	+22	+258	+22	7g6g	-22	-147	-22	-162	-130
			7H	+170	0	+236	0	7h6h	0	-125	0	-140	-108
			8G	—	—	—	—	8g	—	—	—	—	—
			8H	—	—	—	—	9g8g	—	—	—	—	—
		1	—	—	—	—	—	3h4h	0	-56	0	-112	-144
			4H	+95	0	+150	0	4h	0	-71	0	-112	-144
			5G	+144	+26	+216	+26	5g6g	-26	-116	-26	-206	-170
			5H	+118	0	+190	0	5h4h	0	-90	0	-112	-144
			—	—	—	—	—	5h6h	0	-90	0	-180	-144
			—	—	—	—	—	6e	-60	-172	-60	-240	-204
			—	—	—	—	—	6f	-40	-152	-40	-220	-184
			6G	+176	+26	+262	+26	6g	-26	-138	-26	-206	-170
			6H	+150	0	+236	0	6h	0	-112	0	-180	-144
			—	—	—	—	—	7e6e	-60	-200	-60	-240	-204
			7G	+216	+26	+326	+26	7g6g	-26	-166	-26	-206	-170
			7H	+190	0	+300	0	7h6h	0	-140	0	-180	-144
			8G	+262	+26	+401	+26	8g	-26	-206	-26	-306	-170
			8H	+236	0	+375	0	9g8g	-26	-250	-26	-306	-170
		1.25	—	—	—	—	—	3h4h	0	-60	0	-132	-180
			4H	+100	0	+170	0	4h	0	-75	0	-132	-180
			5G	+153	+28	+240	+28	5g6g	-28	-123	-28	-240	-208
			5H	+125	0	+212	0	5h4h	0	-95	0	-132	-180
			—	—	—	—	—	5h6h	0	-95	0	-212	-180
			—	—	—	—	—	6e	-63	-181	-63	-275	-243
			—	—	—	—	—	6f	-42	-160	-42	-254	-222
			6G	+188	+28	+293	+28	6g	-28	-146	-28	-240	-208
			6H	+160	0	+265	0	6h	0	-118	0	-212	-180
			—	—	—	—	—	7e6e	-63	-213	-63	-275	-243
			7G	+228	+28	+363	+28	7g6g	-28	-178	-28	-240	-208
			7H	+200	0	+335	0	7h6h	0	-150	0	-212	-180
			8G	+278	+28	+453	+28	8g	-28	-218	-28	-363	-208
			8H	+250	0	+425	0	9g8g	-28	-264	-28	-363	-208
		1.5	—	—	—	—	—	3h4h	0	-67	0	-150	-217
			4H	+112	0	+190	0	4h	0	-85	0	-150	-217

（续）

基本大径/mm		螺距/mm	内螺纹/μm					外螺纹/μm					
			公差带	中径		小径		公差带	中径		小径		小径
>	≤			ES	EI	ES	EI		es	ei	es	ei	
5.6	11.2	1.5	5G	+172	+32	+268	+32	5g6g	-32	-138	-32	-268	-249
			5H	+140	0	+236	0	5h4h	0	-106	0	-150	-217
			—	—	—	—	—	5h6h	0	-106	0	-236	-217
			—	—	—	—	—	6e	-67	-199	-67	-303	-284
			—	—	—	—	—	6f	-45	-177	-45	-281	-262
			6G	+212	+32	+332	+32	6g	-32	-164	-32	-268	-249
			6H	+180	0	+300	0	6h	0	-132	0	-236	-217
			—	—	—	—	—	7e6e	-67	-237	-67	-303	-284
			7G	+256	+32	+407	+32	7g6g	-32	-202	-32	-268	-249
			7H	+224	0	+375	0	7h6h	0	-170	0	-236	-217
			8G	+312	+32	+507	+32	8g	-32	-244	-32	-407	-249
			8H	+280	0	+475	0	9g8g	-32	-297	-32	-407	-249
11.2	22.4	1	—	—	—	—	—	3h4h	0	-60	0	-112	-144
			4H	+100	0	+150	0	4h	0	-75	0	-112	-144
			5G	+151	+26	+216	+26	5g6g	-26	-121	-26	-206	-170
			5H	+125	0	+190	0	5h6h	0	-95	0	-112	-144
			—	—	—	—	—	5h4h	0	-95	0	-180	-144
			—	—	—	—	—	6e	-60	-178	-60	-240	-204
			—	—	—	—	—	6f	-40	-158	-40	-220	-184
			6G	+186	+26	+262	+26	6g	-26	-144	-26	-206	-170
			6H	+160	0	+236	0	6h	0	-118	0	-180	-144
			—	—	—	—	—	7e6e	-60	-210	-60	-240	-204
			7G	+226	+26	+336	+26	7g6g	-26	-176	-26	-206	-170
			7H	+200	0	+300	0	7h6h	0	-150	0	-180	-144
			8G	+276	+26	+401	+26	8g	-26	-216	-26	-306	-170
			8H	+250	0	+375	0	9g8g	-26	-262	-26	-306	-170
		1.25	—	—	—	—	—	3h4h	0	-67	0	-132	-180
			4H	+112	0	+170	0	4h	0	-85	0	-132	-180
			5G	+168	+28	+240	+28	5g6g	-28	-134	-28	-240	-208
			5H	+140	0	+212	0	5h4h	0	-106	0	-132	-180
			—	—	—	—	—	5h6h	0	-106	0	-212	-180
			—	—	—	—	—	6e	-63	-195	-63	-275	-243
			—	—	—	—	—	6f	-42	-174	-42	-254	-222
			6G	+208	+28	+293	+28	6g	-28	-160	-28	-240	-208

（续）

基本大径/mm		螺距/mm	内螺纹/μm					外螺纹/μm					
			公差带	中径		小径		公差带	中径		小径		小径
>	≤			ES	EI	ES	EI		es	ei	es	ei	
11.2	22.4	1.25	6H	+180	0	+265	0	6h	0	-132	0	-212	-180
			—	—	—	—	—	7e6e	-63	-233	-63	-275	-243
			7G	+252	+28	+363	+28	7g6g	-28	-198	-28	-240	-208
			7H	+224	0	+335	0	7h6h	0	-170	0	-212	-180
			8G	+308	+28	+453	+28	8g	-28	-240	-28	-363	-208
			8H	+280	0	+425	0	9g8g	-28	-293	-28	-363	-208
		1.5	—	—	—	—	—	3h4h	0	-71	0	-150	-217
			4H	+118	0	+190	0	4h	0	-90	0	-150	-217
			5G	+182	+32	+268	+32	5g6g	-32	-144	-32	-268	-249
			5H	+150	0	+236	0	5h4h	0	-112	0	-150	-217
			—	—	—	—	—	5h6h	0	-112	0	-236	-217
			—	—	—	—	—	6e	-67	-207	-67	-303	-284
			—	—	—	—	—	6f	-45	-185	-45	-281	-262
			6G	+222	+32	+332	+32	6g	-32	-172	-32	-268	-249
			6H	+190	0	+300	0	6h	0	-140	0	-236	-217
			—	—	—	—	—	7e6e	-67	-247	-67	-303	-284
			7G	+268	+32	+407	+32	7g6g	-32	-212	-32	-268	-249
			7H	+236	0	+375	0	7h6h	0	-180	0	-236	-217
			8G	+332	+32	+507	+32	8g	-32	-256	-32	-407	-249
			8H	+300	0	+475	0	9g8g	-32	-312	-32	-407	-249
		1.75	—	—	—	—	—	3h4h	0	-75	0	-170	-253
			4H	+125	0	+212	0	4h	0	-95	0	-170	-253
			5G	+194	+34	+299	+34	5g6g	-34	-152	-34	-299	-287
			5H	+160	0	+265	0	5h4h	0	-118	0	-170	-253
			—	—	—	—	—	5h6h	0	-118	0	-265	-253
			—	—	—	—	—	6e	-71	-221	-71	-336	-324
			—	—	—	—	—	6f	-48	-198	-48	-313	-301
			6G	+234	+34	+369	+34	6g	-34	-184	-34	-299	-287
			6H	+200	0	+335	0	6h	0	-150	0	-265	-253
			—	—	—	—	—	7e6e	-71	-261	-71	-336	-324
			7G	+284	+34	+459	+34	7g6g	-34	-224	-34	-299	-287
			7H	+250	0	+425	0	7h6h	0	-190	0	-265	-253
			8G	+349	+34	+564	+34	8g	-34	-270	-34	-459	-287
			8H	+315	0	+530	0	9g8g	-34	-334	-34	-459	-287

（续）

基本大径/mm		螺距/mm	内螺纹/μm					外螺纹/μm					
			公差带	中径		小径		公差带	中径		小径		小径
>	≤			ES	EI	ES	EI		es	ei	es	ei	
11.2	22.4	2	—	—	—	—	—	3h4h	0	−80	0	−180	−289
			4H	+132	0	+236	0	4h	0	−100	0	−180	−289
			5G	+208	+38	+338	+38	5g6g	−38	−163	−38	−318	−327
			5H	+170	0	+300	0	5h4h	0	−125	0	−180	−289
			—	—	—	—	—	5h6h	0	−125	0	−280	−289
			—	—	—	—	—	6e	−71	−231	−71	−351	−360
			—	—	—	—	—	6f	−52	−212	−52	−332	−341
			6G	+250	+38	+413	+38	6g	−38	−198	−38	−318	−327
			6H	+212	0	+375	0	6h	0	−160	0	−280	−289
			—	—	—	—	—	7e6e	−71	−271	−71	−351	−360
			7G	+303	+38	+513	+38	7g6g	−38	−238	−38	−318	−327
			7H	+265	0	+475	0	7h6h	0	−200	0	−280	−289
			8G	+373	+38	+638	+38	8g	−38	−288	−38	−488	−327
			8H	+335	0	+600	0	9g8g	−38	−353	−38	−448	−327
		2.5	—	—	—	—	—	3h4h	0	−85	0	−212	−361
			4H	+140	0	+280	0	4h	0	−106	0	−212	−361
			5G	+222	+42	+397	+42	5g6g	−42	−174	−42	−377	−403
			5H	+180	0	+355	0	5h4h	0	−132	0	−212	−361
			—	—	—	—	—	5h6h	0	−132	0	−335	−361
			—	—	—	—	—	6e	−80	−250	−80	−415	−441
			—	—	—	—	—	6f	−58	−228	−58	−393	−419
			6G	+266	+42	+492	+42	6g	−42	−212	−42	−377	−403
			6H	+224	0	+450	0	6h	0	−170	0	−335	−361
			—	—	—	—	—	7e6e	−80	−292	−80	−415	−441
			7G	+322	+42	+602	+42	7g6g	−42	−254	−42	−377	−403
			7H	+280	0	+560	0	7h6h	0	−212	0	−335	−361
			8G	+397	+42	+752	+42	8g	−42	−307	−42	−572	−403
			8H	+355	0	+710	0	9g8g	−42	−377	−42	−572	−403

注：1. ES 和 es 分别为内、外螺纹的上极限偏差代号；EI 和 ei 分别为内、外螺纹的下极限偏差代号。
2. 基本大径≤5.6mm 及 >22.4mm 的螺纹极限偏差未收入本表，可查阅 GB/T 2516 — 2003。
3. 外螺纹小径的偏差值用于螺纹应力计算。

表 10-3 螺纹的公差等级表

螺纹类型	螺纹直径	公差等级
外螺纹	大径 d	4、6、8
	中径 d_2	3、4、5、6、7、8、9
内螺纹	中径 D_2	4、5、6、7、8
	小径 D_1	4、5、6、7、8

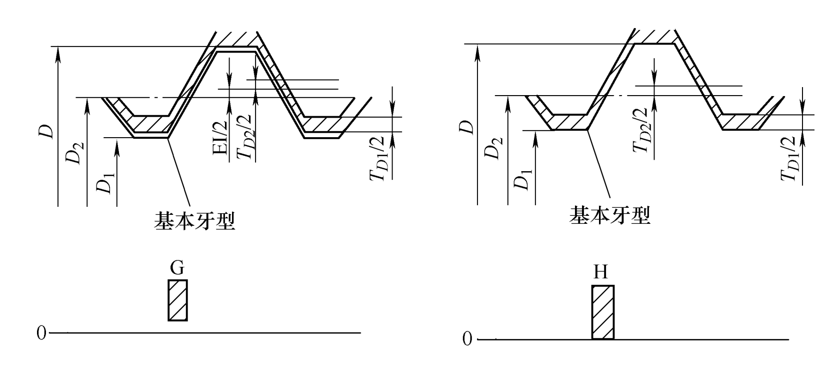


图 10-3 内螺纹的基本偏差

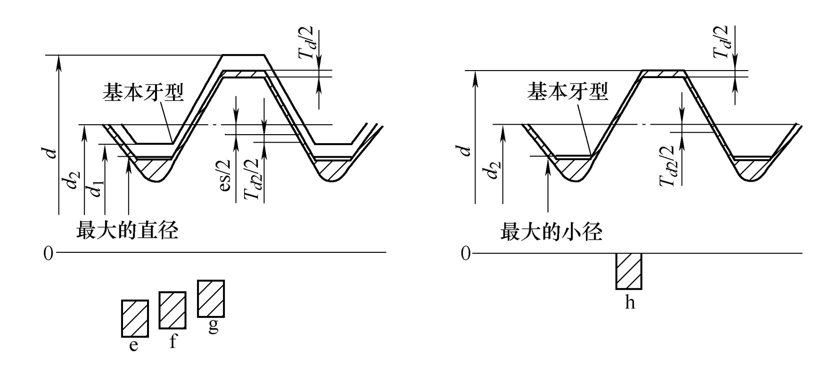


图 10-4 外螺纹基本偏差

10.2.2 旋合长度

螺纹的公差等级受螺纹的旋合长度影响，标准旋合长度分为长旋合长度（L）、中等旋合长度（N）和短旋合长度（S）共三组，通常采用中等旋合长度。具体旋合长度数值见表 10-4。

表 10-4 普通螺纹的旋合长度

公称直径 *D*、*d*		螺距 *P*	旋合长度			
			S	N		L
>	≤		≤	>	≤	>
1.4	2.8	0.25 0.35 0.4 0.45	0.6 0.8 1 1.3	0.6 0.8 1 1.3	1.9 2.6 3 3.8	1.9 2.6 3 3.8
2.8	5.6	0.35 0.5 0.6 0.7 0.75 0.8	1 1.5 1.7 2 2.2 2.5	1 1.5 1.7 2 2.2 2.5	3 4.5 5 6 6.7 7.5	3 4.5 5 6 6.7 7.5
5.6	11.2	0.75 1 1.25 1.5	2.4 3 4 5	2.4 3 4 5	7.1 9 12 15	7.1 9 12 15
11.2	22.4	1 1.25 1.5 1.75 2 2.5	3.8 4.5 5.6 6 8 10	3.8 4.5 5.6 6 8 10	11 13 16 18 24 30	11 13 16 18 24 30

公称直径 *D*、*d*		螺距 *P*	旋合长度			
			S	N		L
>	≤		≤	>	≤	>
22.4	45	1 1.5 2 3 3.5 4 4.5	4 6.3 8.5 12 15 18 21	4 6.3 8.5 12 15 18 21	12 19 25 36 45 53 63	12 19 25 36 45 53 63
45	90	1.5 2 3 4 5 5.5 6	7.5 9.5 15 19 24 28 32	7.5 9.5 15 19 24 28 32	22 28 45 56 71 85 95	22 28 45 56 71 85 95
90	180	2 3 4	12 18 24	12 18 24	36 53 71	36 53 71
180	355	3 4 6 8	20 26 40 50	20 26 40 50	60 80 118 150	60 80 118 150

10.2.3 螺纹公差带的选择

1. 精度等级的选择

根据使用场合的不同，螺纹的精度等级分为精密级、中等级和粗糙级共三个等级。其中，公差等级 3、4、5 级为精密级，6 级为中等级，7、8、9 级为粗糙级。精密级用于精密螺纹，当要求配合性质变动较小时采用；中等级用于一般用途场合；粗糙级用于对精度要求不高或制造比较困难的场合。

2. 旋合长度的选择

在精度等级选择时，一般优先选用中等旋合长度（N）组。下列特殊情况需要进行重点考虑：若需要满足调整量大小的场合应选择长旋合长度（L）组；用于铝、锌合金上的螺纹，应选择长旋合长度（L）组；受载小的场合，一般选择短旋合长度（S）组。

3. 配合代号的选择

1）为了保证螺纹具有足够高的接触高度和强度，良好的旋合性，通常选择最

小间隙为零的配合（H/h）。

2）经常拆卸的场合，通常选择较小间隙的配合（H/G 或 g/H）。

3）需要镀层的螺纹，通常选择 H/e 或 H/f。若内、外螺纹均镀层时，则选择 G/e 或 G/f。

根据应用场合和使用，可根据表 10-5 进行选择。

表 10-5 普通螺纹公差带推荐表

螺纹精度	内螺纹			外螺纹			选用原则
	S	N	L	S	N	L	
精密	4H	5H	6H	3h4h	4h①	5h4h 5g4g	用于精密螺纹，当要求配合性质变动较小时采用
中等	5H① （5G）	6H①② 6G①	7H① （7G）	5h6h 5g6g	6h 6f① 6g①② 6e①	7h6h 7g6g 7e6e	一般用途
粗糙		7H （7G）	8H （8G）		8g （8e）	9g8g 9e8e	对精度要求不高或制造比较困难时采用

① 优先选用公差代号。
② 用于大量生产紧固件螺纹。

4. 表面粗糙度的选择

螺纹牙型表面粗糙度主要根据中径公差等级来确定。螺纹牙侧表面粗糙度推荐值见表 10-6。

表 10-6 螺纹牙侧面表面粗糙度参数 *Ra* 值

应 用	螺纹中径公差等级		
	4～5	6～7	8～9
	Ra 不大于/μm		
螺栓、螺钉、螺母	1. 6	3. 2	3. 2～6. 3
轴及套上的螺纹	0. 8～1. 6	1. 6	3. 2

10. 2. 4 普通螺纹的标注

完整的普通螺纹标注包括螺纹特征代号、尺寸代号、螺纹公差带代号、旋合长度代号（或数值）和旋向。

标注过程中需要注意以下几点：

（1）螺纹特征代号 用 M 表示。

（2）尺寸代号

1）单线螺纹用公称直径×螺距表示，粗牙螺纹可不标注螺距。

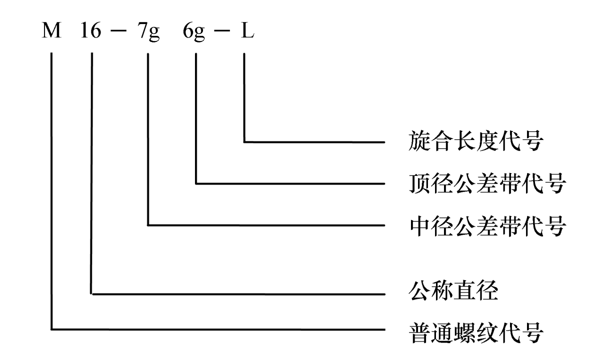
2）多线螺纹用公称直径×Ph 导程×P 螺距表示。

（3）螺纹公差带代号 由中径公差带代号和顶径公差带代号两部分组成。各公差代号均由公差等级和基本偏差组成。若中径代号和顶径的公差代号相同，则只标注一个即可。

（4）旋合长度代号 将长旋合长度（L）组和短旋合长度（S）组代号标注在公差带代号后面，中等旋合长度代号可以不标注。

（5）旋向代号 左旋螺纹标注成LH，右旋螺纹可不标注。

例如，M20×Ph3P1表示：公称直径20mm，导程3mm，螺距1mm。



10.3 普通螺纹的检测

1. 单项检测

单项检测是指对螺纹各个参数进行测量，判断其是否满足公差要求。目的是对螺纹的加工工艺进行分析，或者对螺纹量规及螺纹刀具进行质量检测。检测内容主要是螺纹中径、螺距和牙型半角三个参数。检测方法很多，现在应用比较广泛的是用工具显微镜测螺纹各个参数，用量针测量螺纹中径（三针法），用钢直尺测量外螺纹螺距，用牙型角样板测量外螺纹牙型角。

2. 综合检测

综合检测实际上就是用螺纹公差带控制螺纹各参数误差。目的就是判断螺纹是否合格，不能检测各参数值。内容和方法主要是通过光滑极限量规检测内、外螺纹顶径尺寸是否合格，通过螺纹量规检测内、外螺纹的作用中径及底径是否合格。综合检测由于操作简便，工作效率高，所以广泛用于大批量生产中的螺纹检测。

自测习题十

1. 普通螺纹基本参数有哪些？是如何定义的？
2. 内、外螺纹中径是否合格的判断原则是什么？

3. 螺纹的互换性受哪些因素影响?

4. 试解释下列普通螺纹代号：1） M18 - 7H - S - LH；2） M36 - 7e6e - L；3） M30 × 2 - 6H/6g - LH。

5. 已知一对螺纹配合代号为 M18 × 2 - 7H/7h6h - L，查表确定外螺纹中径、大径和内螺纹中径、小径的极限偏差，并画出公差带图。

第11章　渐开线直齿圆柱齿轮传动的互换性与检测

11.1　概述

11.1.1　齿轮传动要求

齿轮传动具有传动效率高、结构紧凑、工作可靠、传动比稳定等众多优点，广泛应用于机械设备和仪器仪表中。齿轮传动是主要用于传递动力和运动的一种重要传动形式。

齿轮传动的类型有圆柱齿轮传动、锥齿轮传动、蜗杆传动和齿轮齿条传动等。上述类型的齿轮机构应用时是由以齿轮副连接组成两个齿轮、轴承和箱体等部分组成。齿轮的传动精度主要取决于其本身和制造装配精度，其次还取决于轴、轴承以及箱体等零件的制造精度和总体装配精度。

齿轮应用比较广泛，不同的应场合对齿轮传动要求是不同的，对于齿轮传动的要求分析归纳出以下四个特性以及应用情况：

1. 传递运动的准确性

传递运动的准确性是指要求齿轮在一转范围内，传动比变化尽量小，以保证主动齿轮和从动齿轮的运动准确。例如，应用于仪表中的齿轮等。

2. 传动的平稳性

传动的平稳性是指要求在传递运动的过程时瞬时传动比变化尽量小，这样就可以减小冲击、振动和噪声。例如，减速器、机床和汽车中的一般动力齿轮，以及汽轮机中的高速齿轮等。

3. 载荷分布的均匀性

载荷分布的均匀性是指要求齿轮在啮合过程中，处于啮合状态的齿轮沿着全齿宽的方向受到的均匀载荷。若载荷不均匀，就会使齿轮产生磨损、疲劳点蚀和折断，影响齿轮的使用寿命。例如，应用于动力齿轮如减速器、机床和汽车中的齿轮、矿山机械中的齿轮等。

4. 齿轮侧隙的合理性

齿轮副侧隙的合理性是指齿轮在啮合过程时，使齿轮非工作面留有一定的侧隙，以避免由于储存润滑油和受热受力变形以及制造和安装引起的误差导致的卡

死或灼伤现象。例如，应用于百分表、千分表、分度齿轮和矿山机械中的齿轮等。

11.1.2 影响齿轮传动要求的主要加工误差

由于渐开线齿轮齿廓形状取决于模数、齿数和压力角等参数比较复杂，加工起来难度比较大，所以肯定存在一定的加工误差。渐开线齿轮加工方法选用范成法，其工作原理是利用滚刀或插刀在滚齿机或插齿机上与齿轮坯强行啮合切除多余部分。范成法加工过程中形成齿轮加工误差，例如机床本身工艺系统误差，刀具、夹具和齿轮坯的误差以及各部分安装调整误差。本节以滚齿机滚切渐开线直齿圆柱齿轮为例来分析齿轮加工误差。

1. 影响齿轮传动准确性的主要误差

影响齿轮传动准确性的主要误差是以齿轮旋转一转为周期，由于齿轮轮齿分布不均而产生的误差。以滚齿机加工为例进行分析齿轮加工误差。

如图 11-1 所示，滚齿过程实际上就是滚刀 2 与齿轮坯 6 强制啮合的过程。滚刀的纵向切面形状为标准直齿条，滚刀每转一转，该齿条移动一个齿距。齿轮坯 6 安装在机床工作台 5 的心轴 1 上，通过机床分齿传动链，使滚刀转过一转时，工作台恰好转过一个齿距角。工作台和滚刀连续回转，切出所有轮齿的齿形。滚刀架沿着滚齿机刀架导轨上下移动，切出全齿宽，滚刀切入齿轮坯的深度，决定了齿轮的齿厚的大小。在滚齿过程中，不可避免地产生几何偏心和运动偏心。

（1）几何偏心　几何偏心就是指齿轮坯安装在加工机床工作台的心轴时，齿轮坯的几何中心 O_1O_1 不与机床心轴轴线 OO 重合，产生偏心距 e_1，导致心轴与齿轮坯存在间隙，如图 11-1 所示。

如果没有其他误差存在，机床的心轴轴线和滚刀轴线位置是固定的，则加工出来的齿轮实际轮廓相对机床的心轴轴线 O_1O_1 是均匀对称的，而相对齿轮坯轴线 OO 是不均匀对称的。加工后的齿轮由于存在几何偏心，导致齿轮齿顶圆各点到机床的心轴中心的距离不相等，各齿的齿高也不相等，滚刀切入齿轮坯的深度也不相同，齿厚也就随之不同了，相邻的两个齿的齿距也就不相同。

（2）运动偏心　运动偏心是指滚齿时，由于机床分度蜗轮回转中心 O_2 与心轴旋转中心 O 不重合，存在偏心距 e_{1y}，使工作台时快时慢地转动，进而使工作台上齿轮坯时快时慢地转动，如图 11-2 所示。

如果没有其他误差的存在，由于分度蜗轮在一转周期内转速时快时慢，转速快的部分，齿距角大，齿厚较小，最终导致轮齿分布不均，但是齿高处处相等。

综上所述，几何偏心和运动偏心都影响齿轮传动的准确性。其中，几何偏心影响齿廓位置沿着径向方向变动，引起径向误差，与被加工齿轮的直径无关，只由安装误差的大小来确定；而运动偏心使齿廓位置沿着圆周切线方向变动，引起切向误差。若加工机床精度一定，齿轮坯直径越大误差也就越大。

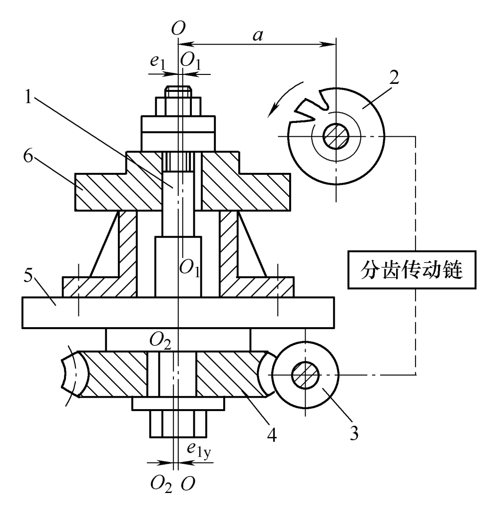


图 11-1 滚齿机切齿示意图
1—心轴 2—滚刀 3—分度蜗杆
4—分度蜗轮 5—工作台 6—齿轮坯

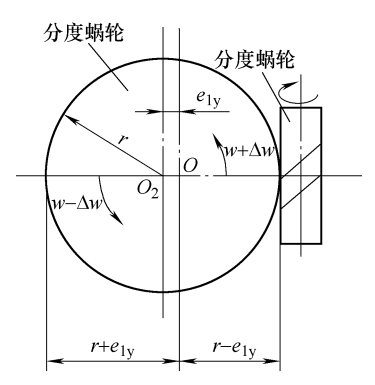


图 11-2 运动偏心——分度蜗轮角速度改变
O_2—分度蜗轮的分度圆中心
O—滚齿机工作台回转中心

2、影响齿轮传动平稳性的主要误差

影响齿轮传动平稳性的主要误差是齿轮的齿距误差和齿形误差，以转过一个齿距角为周期。产生这类误差的原因很多也很复杂，例如切齿刀具误差、刀具的径向跳动和分度蜗杆的径向跳动和轴向窜动。

（1）基圆齿距误差 基圆齿距误差是指实际基圆齿距与公称基圆齿距的差值。根据齿轮啮合原理可知，两个齿轮正确啮合要求基圆齿距相等。若存在基圆齿距误差，则会在啮合过程中产生冲击、振动和噪声，并且不能保证瞬时传动比恒定，如图 11-3 所示。这类误差主要是由刀具的基圆齿距偏差和齿形角误差造成的。

如图 11-3a 所示，当主动轮基圆齿距大于从动轮基圆齿距时，前对轮齿啮合完毕而后对轮齿未进入啮合区，发生瞬间的脱离，引起换齿撞击。相反，如图 11-3b 所示，当主动轮基圆齿距小于从动轮基圆齿距时，从动轮转速加快，同样引起换齿撞击、振动和噪声。

（2）齿形误差 齿形误差是指加工后齿轮截面上的实际齿形与理想渐开线的形状存在的误差，如图 11-4 所示。由于范成法加工过程可视为齿轮齿条啮合，依据齿轮啮合定律可知，啮合线始终通过节点，保证了传动比恒定。实际加工时，刀具本应该与 a 点相接触，实际上却与 a' 相接触，导致齿形与理论渐开线存在误差，以至于不能保证瞬时传动比恒定，使传动不稳定。齿形误差的主要产生原因是刀具制造安装误差、分度蜗杆误差和齿轮坯的安装误差。

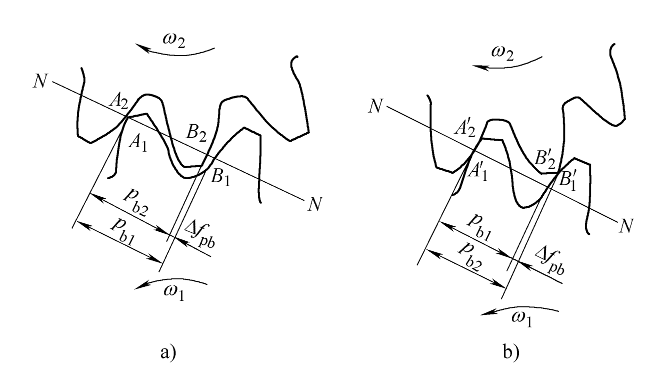


图 11-3 有基圆齿距偏差时齿轮啮合

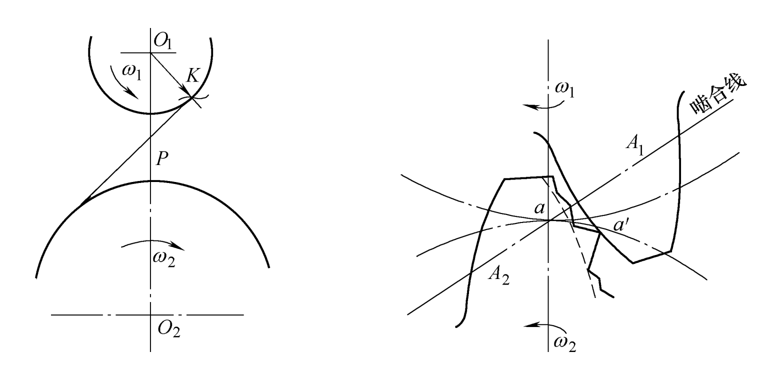


图 11-4 齿形误差分析示意图

综上所述，基圆齿距误差和齿形误差都能引起传动比不恒定，导致齿轮传动不稳定。基圆齿距误差产生于两个轮齿交替啮合的瞬间，而齿形误差产生于两个轮齿啮合的瞬间。

3. 影响载荷分布均匀性的主要误差

1）齿轮因素有基圆齿距误差、齿形误差和齿轮螺旋线误差。其中，基圆齿距误差和齿形误差影响齿轮接触高度，即影响齿高方向载荷均匀性；齿轮螺旋形误差影响齿轮接触长度，即影响齿宽方向载荷均匀性，主要产生原因是机架导轨位置不精确和齿轮坯的基准端面对定位孔轴线的端面圆跳动。

2）齿轮副因素是齿轮副安装轴线的平行度误差，即在轴线平面内和垂直平面内，齿宽和齿高方向的接触精度。主要产生原因是箱体孔轴线的平行度误差。

4. 影响齿轮齿侧隙合理性的主要误差

1）齿轮因素是轮齿齿厚偏差，齿厚偏差就是指实际齿厚与公称齿厚之差。由于齿轮需要润滑，因此，齿轮啮合的过程要保证必要的侧隙，通常将齿轮轮齿切薄，通过限定齿厚的最小减薄量（即齿厚上极限偏差）来获得，随着齿厚的减小，间隙增大。为了避免间隙量过大，通过规定齿厚公差来限制。齿厚的实际尺寸与加工过程的几何偏心有关。

2）齿轮副因素是齿轮副中心距偏差，随着中心距增大，侧隙增大。产生齿轮副中心距偏差的主要原因是箱体孔中心距偏差。

11.1.3 渐开线直齿圆柱齿轮精度国家标准体系

尽管对齿轮的要求很多，但是要针对齿轮所应用的场合来确定对某一个特性要求。本章主要介绍渐开线圆柱齿轮的传动精度以及应用。最新渐开线直齿圆柱齿轮精度国家标准体系如下：

1）GB/T 10095.1—2008《圆柱齿轮　精度制　第1部分：轮齿同侧齿面偏差的定义和允许值》。

2）GB/T 10095.2—2008《圆柱齿轮　精度制　第2部分：径向综合偏差与径向跳动的定义和允许值》。

3）GB/Z 18620.1—2008《圆柱齿轮　检验实施规范　第1部分：轮齿同侧齿面的检验》。

4）GB/Z 18620.2—2008《圆柱齿轮　检验实施规范　第2部分：径向综合偏差、径向跳动、齿厚和侧隙的检验》

5）GB/Z 18620.3—2008《圆柱齿轮　检验实施规范　第3部分：齿轮坯、轴中心距和轴线平行度的检验》。

6）GB/Z 18620.4—2008《圆柱齿轮　检验实施规范　第4部分：表面结构和轮齿接触斑点的检验》。

11.2 单个齿轮同侧齿面的各项偏差的检测及分类

11.2.1 影响传递运动准确性的技术指标及检测

1. 技术指标

（1）齿距累计偏差 ΔF_{pk}　齿距累计偏差是指齿轮端面上，在接近齿高中部的一个与齿轮轴线同心的圆上，任意 k 个齿距的实际弧长与理论弧长的代数差，理论上等于这 k 个单个齿距偏差的代数和。通常累计齿距偏差值规定在1/8圆周内进行评定，取 k 为 $2\sim z/8$ 的整数，其中，z 为被检验齿轮的齿数。

（2）齿距累计总偏差 ΔF_p 和齿距累计总公差 F_p　齿距累计总偏差是指齿轮端面上，在接近齿高中部的一个与齿轮轴线同心的圆上，任意两个同侧齿面间的实际弧长与理论弧长之差的最大绝对值，即任意 k 个齿距累积误差的最大绝对值。齿距累计总公差是对齿距累计总偏差的限制。

（3）切向综合误差 $\Delta F_i'$和 切向综合公差 F_i'　切向综合误差（$\Delta F_i'$）是指被测齿轮与理想精确的测量齿轮在理论中心距下单面啮合时，被测齿轮旋转一周，实际转角与公称转角之差的最大幅度值，该误差以分度圆弧长计值，如图11-5所示。

该数值不可以过大，所以引出切向综合公差 F_i'对其限制。

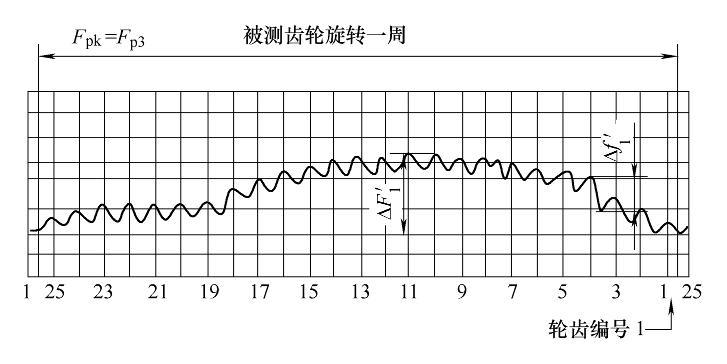


图 11-5　切向综合误差曲线

（4）径向综合误差 $\Delta F_i''$和径向综合公差 F_i''　径向综合误差是指被测齿轮与理想精确的测量齿轮双面啮合时，在被测齿轮转一转内，双啮合中心距的最大变动量，如图 11-6 所示。径向综合公差是对径向综合误差的限制。

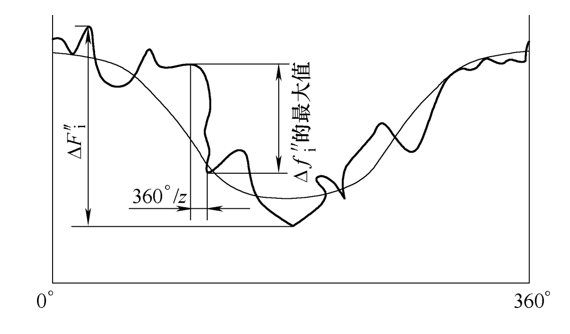


图 11-6　径向综合误差曲线

（5）齿圈径向跳动误差 ΔF_r 和齿圈径向跳动公差 F_r　齿圈径向跳动误差是指齿轮转一转范围内，测头在齿槽内与齿高中部双面接触，测头相对齿轮轴线的最大变动量，如图 11-7 所示。

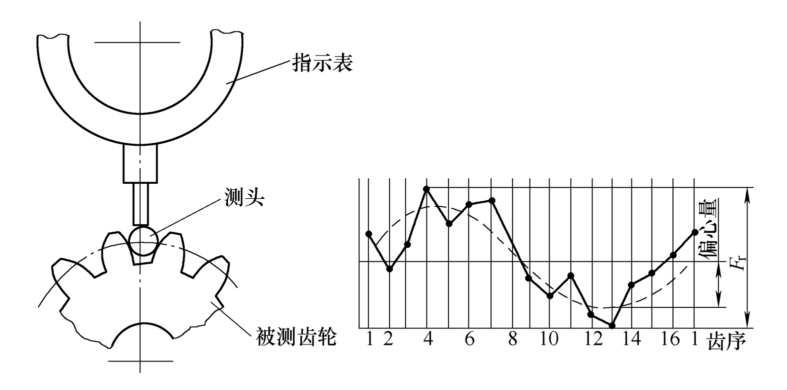


图 11-7　齿圈径向跳动

（6）公法线长度变动误差 ΔF_w 和公法线长度变动公差 F_w　公法线长度变动误差是指齿轮在转一转范围内实际公法线长度最大值与最小值之差。公法线长度变动公差是限制公法线变动误差的。公法线变动误差不能反映安装偏心引起的径向

误差，因此不能充分用其衡量齿轮传递运动的精确性。可用公法线千分尺和公法线指示卡规进行测量。

2. 各指标的检验

（1）齿距累计偏差的检验　齿距累计偏差检验通常选用相对法测量，如图11-8所示。先测量单个轮齿的齿距误差，然后测量两个、三个、四个、五个……。以第一个轮齿作为计算齿距累计误差的原点，其余的取其相对差。将其数据整理，取所有的实际弧长与公称弧长之差的最大绝对值，即为齿距累计偏差，如图11-9所示。

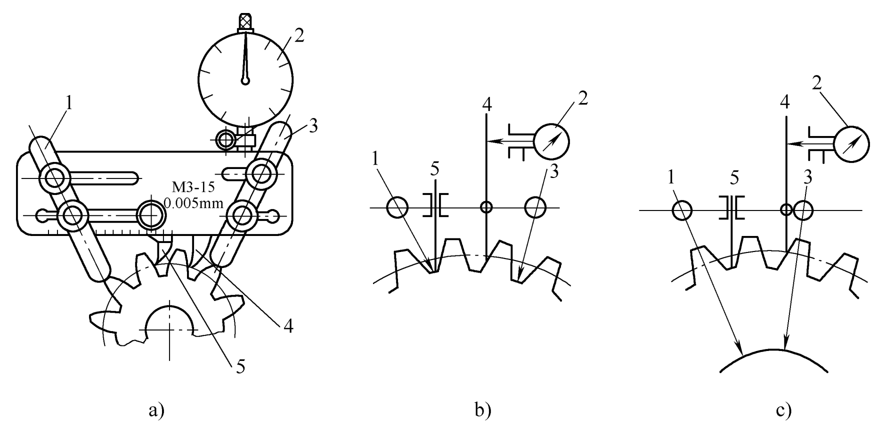


图11-8　齿距累积偏差的测量

a）齿顶圆定位　b）齿根圆定位　c）内孔定位

1、3—定位支脚　2—指示表　4—活动量爪　5—固定量爪

（2）切向综合误差的检验　切向综合误差是用单面啮合综合检测仪测量的，如图11-10所示。若被测齿轮存在误差时，将会使回转角有误差，回转角误差将会变成两路信号的相位差，经过比相器和记录器，最后记录出误差曲线。

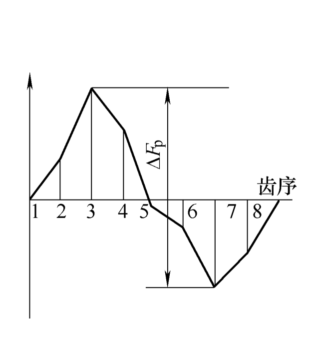


图11-9　齿距累计总偏差

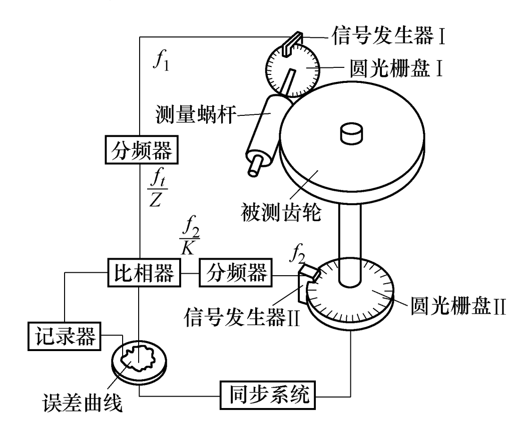


图11-10　光栅式单啮仪工作示意图

（3）径向综合误差的检验　径向综合误差可用双啮仪进行测量，如图 11-11 所示。工作步骤：①将被测齿轮 6 安装在固定托板 7 的心轴上，基准齿轮 5 安装在浮动托板 4 的心轴上，指示表 9 的指针归零处理；②按照两齿轮的公称中心距转动手柄 8，将固定托板调整到相应的位置，然后将固定托板锁紧；③调整浮动托板手柄 3 至右侧，使两齿轮进行紧密无侧隙的双面啮合；④将被测齿轮转一圈，测得数据从指示表 9 上读出，也可在记录纸 1 上绘制出误差曲线 2。

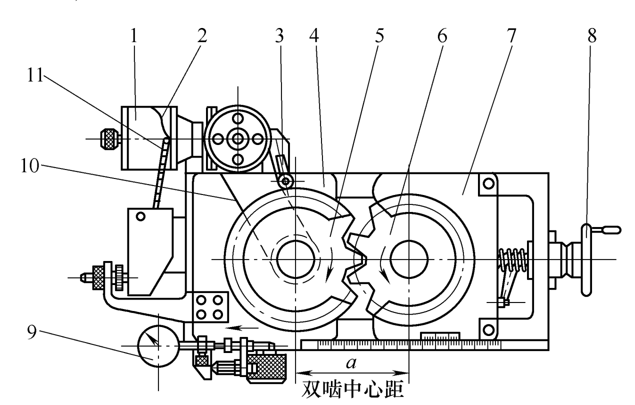


图 11-11　双啮仪工作示意图
1—记录纸　2—误差曲线　3—手柄　4—浮动托板　5—基准齿轮　6—被测齿轮
7—固定托板　8—手轮　9—指示表　10—传动带　11—划针

11.2.2　影响齿轮传动平稳性的技术指标及检测

1. 技术指标

（1）单个齿距的偏差 F_{pt}　单个齿距的偏差是指齿轮端面上，在接近齿高中部的一个与齿轮轴线同心的圆上，实际齿距与理论齿距的代数差，如图 11-12所示。若实际齿距大于公称齿距，则齿距偏差为正；若实际齿距小于公称齿距，则齿距偏差为负。

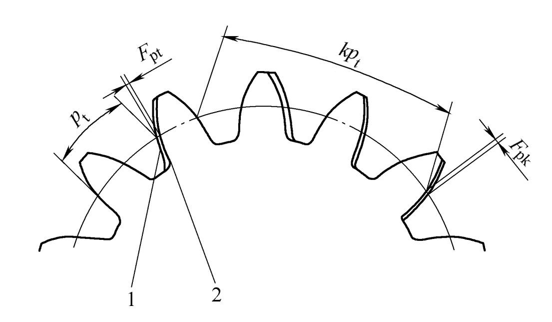


图 11-12　单个齿距偏差和齿距累积偏差
1—理论轮廓线　2—实际轮廓线

（2）齿廓总偏差 ΔF_α 与齿廓总公差 F_α　在计值范围（L_α）内，包容实际齿廓迹线的两条设计齿廓迹线间的距离，如图 11-13 所示，其中：图 11-13a 为设计齿廓是未修形的渐开线，实际齿廓在减薄区内具有偏向体内的负偏差并超出包容迹线，未计入评定范围；图 11-13b 为设计齿廓是修形的渐开线，实际齿廓在减薄区内具有偏向体内的负偏差，未超出包容迹线；图 11-13c

为设计齿廓是修形的渐开线，实际齿廓在减薄区内具有偏向体外的正偏差，计入评定范围。说明一下三个长度：1）可用长度（L_{AF}）是指两条端面基圆切线之差。其中一条是从基圆到可用齿廓的外界限点，另一条是从基圆到可用齿廓的内界限点。根据设计可知，可用长度的内界限点被齿顶、齿顶倒棱或齿顶倒角的起点 A 限定，在朝齿根方向上，可用长度的内界限点被齿根圆角 F 所限定。2）有效长度（L_{AE}）是指可用长度对于与有效齿廓的那部分。对于齿顶，有与可用长度同样的限定 A 点；对于齿根，有效长度延伸至与之配对齿轮的有效啮合的终点 E。3）齿廓计值范围（L_α）是指可用长度的一部分，除非有特殊规定外，一般齿廓计值范围取从 E 点开始延伸的有效长度 L_{AE} 的 92%。

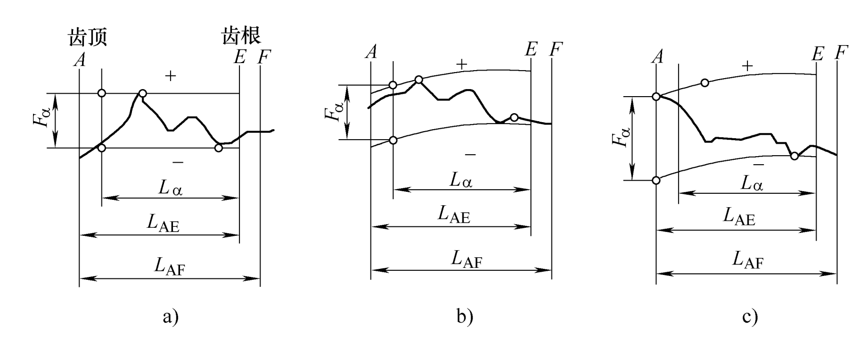


图 11-13　齿廓总偏差

（3）一齿切向综合误差 $\Delta f'_i$ 和一齿切向综合公差 f'_i　一齿切向综合误差是指在被测齿轮与理想精确的测量齿轮单面啮合时，在被测齿轮一个齿距角内，实际转角与公称转角之差的最大幅度值，以分度圆弧长计值，如图 11-5 所示。它是评定齿轮传动平稳性的重要指标。一齿切向综合公差是对一齿切向误差的限制。

（4）一齿径向综合误差 $\Delta f''_i$ 和一齿径向综合公差 f''_i　一齿径向综合误差是指被测齿轮与理想精确的测量齿轮双面啮合时，在被测齿轮一齿距角内，双啮合中心距的变动量，如图 11-6 所示。一齿径向综合公差是对一齿径向综合误差的限制。一齿径向综合误差与一齿切向综合误差相同，也是评定齿轮传动平稳性的综合指标，但是由于前者受双齿面误差共同影响而后者只受单齿面误差影响，所以前者评定齿轮传动平稳性不如后者精确。

2. 各指标的检验

（1）单个齿距偏差的检验　单个齿距偏差的测量方法和使用仪器与齿距累计总偏差的测量相同，主要是由机床传动链误差造成的。

（2）齿廓总偏差的检验　齿廓总偏差通常采用单盘式或万能式渐开线检查仪及齿轮单面啮合整体误差测量仪进行检验。单盘式渐开线检查仪如图 11-14 所示。

工作原理：被测齿轮 2 与一直径等于该齿轮基圆直径的基圆盘 1 同轴安装。转动手轮 6，丝杠 5 使纵滑板 7 移动，直尺 3 与基圆盘在一定的接触压力下做纯滚动。杠杆 4 一端为侧头与齿面接触，另一端与指示表 8 相连。直尺 3 与基圆盘 1 接触点在其切平面上，滚动时，测量头与齿廓相对运动的轨迹应该是正确的渐开线。若被测齿廓不是理想的渐开线，则测头摆动经杠杆 4 在指示表 8 上读出数据。

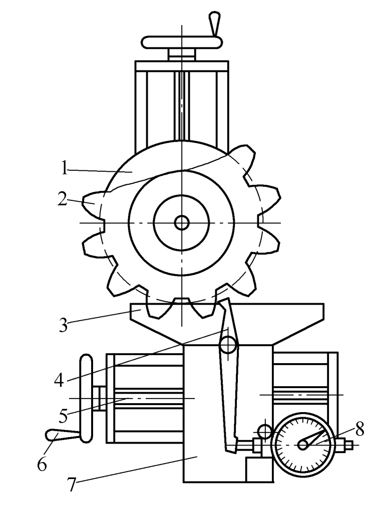


图 11-14 单盘式渐开线检查仪
1—基圆盘 2—被测齿轮 3—直尺 4—杠杆 5—丝杠 6—手轮 7—滑板 8—指示表

（3）一齿切向综合误差和一齿径向综合误差的检验 一齿切向综合误差和一齿径向综合误差的检验与切向综合误差和径向综合误差的检验方法以及仪器是一样的，就不进行详细介绍了，详见切向综合误差和径向综合误差的检验。

11.2.3 影响载荷分布均匀性的技术指标及检测

1. 技术指标：螺旋线总偏差 ΔF_β 和螺旋线总公差 F_β

螺旋线总偏差是指在计值范围（L_β）内，包容实际螺旋线迹线的两条设计螺旋线迹线间的距离，如图 11-15 所示，其中：图 11-15a 为设计螺旋线是未修形的螺旋线，实际螺旋线在减薄区内具有偏向体内的负偏差并超出包容迹线，未计入评定范围；图 11-15b 为设计螺旋线是修形的螺旋线线，实际螺旋线在减薄区内具有偏向体内的负偏差，未超出包容迹线；图 11-15c 为设计螺旋线是修形的螺旋线，实际螺旋线在减薄区内具有偏向体外的正偏差，计入评定范围。螺旋线计值范围除非有特殊规定外，其长度为迹线长度在其两端各减去 5% 的齿宽或者一个模数的长度数值中的较小值后的长度。螺旋线总公差是对螺旋线总偏差的限制。

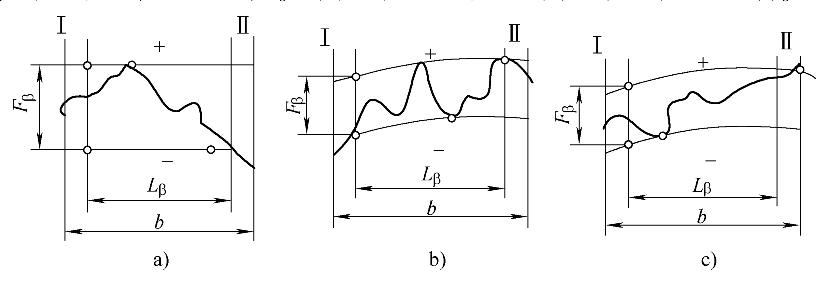


图 11-15 螺旋线总偏差

2. 指标检验

螺旋线总偏差检验：低于8级精度的渐开线直齿圆柱齿轮的螺旋线总偏差可以通过下列简单的方法进行测量。如图11-16a所示，将小圆棒2（$d \approx 1.68m$）放入齿间内，用指示表1在两端测量读数差，并按齿宽长度折算缩小，即为螺旋线总偏差值。又如图11-16b所示，调整杠杆百分表4的测头处于齿面的最高位置，在两端的齿面上接触并且往复移动，两端最高的读数差即为螺旋线总偏差值。

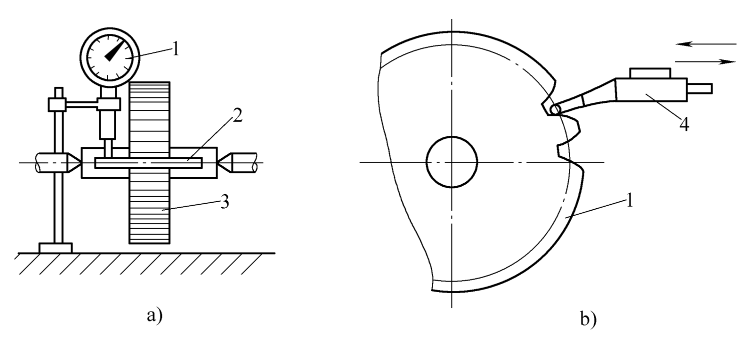


图11-16 螺旋线总偏差的测量
1—指示表 2—小圆棒 3—被测齿轮 4—杠杆百分表

11.2.4 影响传动侧隙合理性的技术指标及检测

1. 技术指标

（1）齿厚偏差 E_s 和齿厚公差 T_s 齿厚偏差是指实际齿厚 S_{na} 与公称齿厚 S_n 之差。公称齿厚 S_n 是指无侧隙啮合时，齿厚的理论值。实际齿厚 S_{na} 是指通过测量得到的齿厚。齿厚极限偏差有两个：一个是上极限齿厚偏差 E_{sns}，即最大极限齿厚与公称齿厚之差；另一个是下极限齿厚偏差 E_{sni}，即最小极限齿厚与公称齿厚之差。齿厚公差 T_s 是指两个齿厚极限偏差的绝对值，具体尺寸如图11-17所示。齿厚公差是对齿厚偏差的限制。

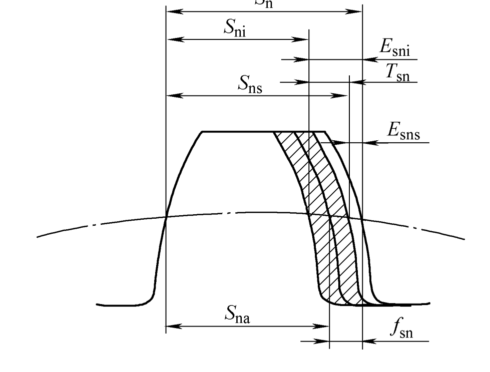


图11-17 单个齿的齿厚术语

（2）公法线平均长度偏差 E_{wm} 与公法线平均长度公差 T_{wm} 公法线平均长度偏差是指在齿轮转一转范围内，各条实际公法线的平均值与公称值之差。而公法线平均长度公差是对公法线平均长度偏差的限制。

2. 各指标的检验

通常用齿厚游标卡尺测量齿厚，用公法线千分尺测量公法线长度。

11.3 影响齿轮副传动质量的偏差分析

11.3.1 齿轮副轴线平行度偏差

1. 轴线平面内的轴线平行度偏差 $\Delta f_{\Sigma\delta}$

在两齿轮轴线的公共平面上测量的平行度偏差，称为轴线平面内的轴线平行度偏差。所谓的公共平面是指跨距大（L）的那根轴的轴线与另一根轴上的轴承所形成的，如图 11-18 所示。

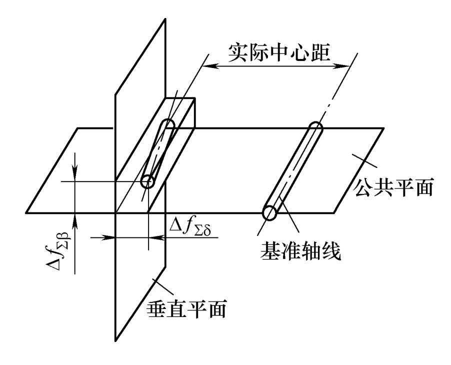


图 11-18 齿轮副轴线平行度偏差

2. 垂直平面内的轴线平行度偏差 $\Delta f_{\Sigma\beta}$

在过轴承中心，垂直于公共平面上测量的平行度偏差，称为垂直平面内的轴线平行度偏差，如图 11-18 所示。

最大的轴线的平行度偏差推荐：$f_{\Sigma\delta}=(L/b)F_\beta$；$\Delta f_{\Sigma\beta}=0.5(L/b)F_\beta$。其中，$L$ 为最大轴承跨距；b 为齿轮宽度；F_β 为螺旋线总偏差。

3. 检验方法

检验方法与按照几何误差中平行度误差的测量方法相同。

11.3.2 齿轮副中心距偏差

齿轮副中心距偏差是指在齿轮副齿宽中间平面内，实际中心距与公称中心距之差。中心距误差影响齿轮装配后传动过程中的侧隙和啮合角的大小，改变传动受力状况。用齿轮副中心距极限偏差来控制齿轮副中心距偏差。通常采用卡尺和千分尺等测量器具测量。

11.3.3 齿轮副侧隙

齿轮副侧隙是指两个相互啮合的齿轮的工作面接触时，在非工作齿面间形成的间隙。齿轮副侧隙有以下两种：

1. 齿轮副的圆周侧隙 $j_{\omega t}$

齿轮副的圆周侧隙是指安装后的齿轮，使其中一个齿轮固定，另一个齿轮在圆周方向上所能转过的弧长，以分度圆弧长计值，如图 11-19a 所示。

2. 齿轮副的法向侧隙 j_{bn}

齿轮副法向侧隙是指两个相互啮合的齿轮工作面接触时，在两个非工作齿面间的最短距离，如图 11-19b 所示。

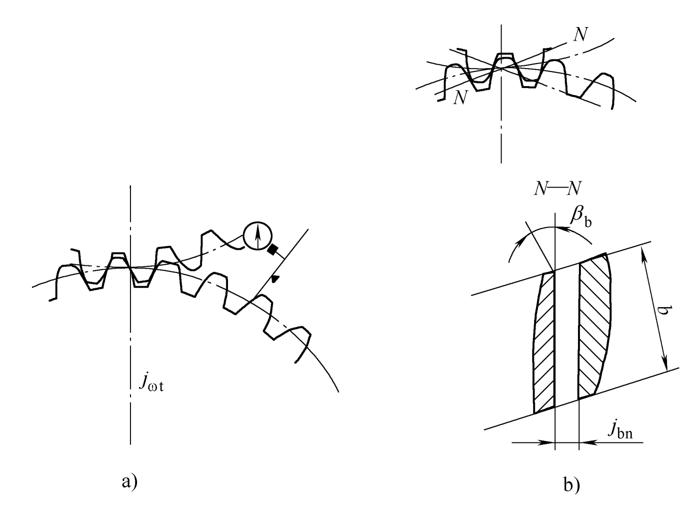


图 11-19 齿轮副的侧隙

11.3.4 齿轮副切向综合误差和齿轮副一齿切向综合误差

齿轮副的切向综合误差是指安装好的齿轮副，在相互啮合足够多的转数内，一个齿轮相对于另一个齿轮在单个齿距内的实际转角与公称转角之差的总幅度值，以分度圆弧长计值，主要影响齿轮传动的准确性。齿轮副的切向综合公差是对齿轮副的切向综合误差的限制，通常等于两个齿轮的切向综合误差之和。

齿轮副的一齿切向综合误差是指安装好的齿轮副，在相互啮合足够多的转数内，一个齿轮相对于另一个齿轮在单个齿距内的实际转角与公称转角之差的最大幅度值，以分度圆弧长计值，主要影响齿轮传动的稳定性。齿轮副的一齿切向综合公差是对齿轮副的一齿切向综合误差的限制，通常等于另一齿轮的一齿切向综合误差之和。

11.3.5 齿轮副的接触斑点

齿轮副的接触斑点是指装配（在箱体或者实验台上）好的齿轮副，在轻微制动下，运转后的齿面上分布的接触擦亮痕迹。接触斑点可以充分体现轮齿间载荷分布情况，还可以对齿轮齿廓和螺旋形精度进行评估。

11.4 圆柱齿轮精度标准及应用

11.4.1 齿轮精度等级和公差值

1. 精度等级

GB/T 10095.1—2008 规定了齿轮的精度等级由 0、1、2、3、…、12 级，共 13

个精度等级组成。其中，0 级为最高精度级，12 级为最低精度级。特别要注意的是 GB/T 10095. 2—2008 中的 F_i''和 f_i''只由 4 ~ 12 级，共 9 个精度等级组成。

2. 齿轮精度公差值

GB/T 10095. 1—2008 规定了单个齿距公差、齿距累计总公差、齿廓总公差、螺旋线总公差、一齿切向综合公差等的公差值。GB/T 10095. 2—2008 规定了径向综合公差和径向跳动公差的精度公差值及齿轮副中心距偏差。具体见表 11-1 ~ 表 11-9。

表 11-1　单个齿距偏差 $\pm f_{pt}$（GB/T 10095. 1—2008）　（单位：μm）

分度圆直径 d/mm	模数 m/mm	精度等级							
		3	4	5	6	7	8	9	10
$20 < d \leq 50$	$0.5 \leq m \leq 2$	2.5	3.5	5.0	7.0	10.0	14.0	20.0	28.0
	$2 < m \leq 3.5$	2.7	3.9	5.5	7.5	11.0	15.0	22.0	31.0
	$3.5 < m \leq 6$	3.0	4.3	6.0	8.5	12.0	17.0	24.0	34.0
	$6 < m \leq 10$	3.5	4.9	7.0	10.5	14.0	20.0	28.0	40.0
$50 < d \leq 125$	$0.5 \leq m \leq 2$	2.7	3.8	5.5	7.5	11.0	15.0	21.0	30.0
	$2 < m \leq 3.5$	2.9	4.1	6.0	8.5	12.0	17.0	23.0	33.0
	$3.5 < m \leq 6$	3.2	4.6	6.5	9.0	13.0	18.0	26.0	36.0
	$6 < m \leq 10$	3.7	5.0	7.5	10.0	15.0	21.0	30.0	42.0
$125 < d \leq 280$	$0.5 \leq m \leq 2$	3.0	4.2	6.0	8.5	12.0	17.0	24.0	34.0
	$2 < m \leq 3.5$	3.2	4.6	6.5	9.0	13.0	18.0	26.0	36.0
	$3.5 < m \leq 6$	3.5	5.0	7.0	10.0	14.0	20.0	28.0	40.0
	$6 < m \leq 10$	4.0	5.5	8.0	11.0	16.0	23.0	32.0	45.0
$280 < d \leq 560$	$0.5 \leq m \leq 2$	3.3	4.7	5.5	9.5	13.0	19.0	27.0	38.0
	$2 < m \leq 3.5$	3.6	5.0	7.0	10.0	14.0	20.0	29.0	41.0
	$3.5 < m \leq 6$	3.9	5.5	8.0	11.0	16.0	22.0	31.0	44.0
	$6 < m \leq 10$	4.4	6.0	8.5	12.0	17.0	25.0	25.0	49.0

表 11-2　齿距累计总公差 F_p（GB/T 10095. 1—2008）　（单位：μm）

分度圆直径 d/mm	模数 m/mm	精度等级							
		3	4	5	6	7	8	9	10
$20 < d \leq 50$	$0.5 \leq m \leq 2$	7.0	10.0	14.0	20.0	29.0	41.0	57.0	81.0
	$2 < m \leq 3.5$	7.5	10.0	15.0	21.0	30.0	42.0	59.0	84.0
	$3.5 < m \leq 6$	7.5	11.0	15.0	22.0	31.0	44.0	62.0	87.0
	$6 < m \leq 10$	8.0	12.0	16.0	23.0	33.0	46.0	65.0	93.0

（续）

分度圆直径 d/mm	模数 m/mm	精度等级							
		3	4	5	6	7	8	9	10
$50 < d \leq 125$	$0.5 \leq m \leq 2$	9.0	13.0	18.0	26.0	37.0	52.0	74.0	104.0
	$2 < m \leq 3.5$	9.5	13.0	19.0	27.0	38.0	53.0	73.0	107.0
	$3.5 < m \leq 6$	9.5	14.0	19.0	28.0	39.0	55.0	78.0	110.0
	$6 < m \leq 10$	10.0	14.0	20.0	29.0	41.0	58.0	82.0	116.0
$125 < d \leq 280$	$0.5 \leq m \leq 2$	12.0	17.0	24.0	35.0	49.0	69.0	98.0	138.0
	$2 < m \leq 3.5$	12.0	18.0	25.0	35.0	50.0	70.0	100.0	141.0
	$3.5 < m \leq 6$	12.0	18.0	25.0	36.0	51.0	72.0	102.0	144.0
	$6 < m \leq 10$	13.0	19.0	26.0	37.0	53.0	75.0	106.0	149.0
$280 < d \leq 560$	$0.5 \leq m \leq 2$	16.0	23.0	32.0	46.0	64.0	91.0	129.0	182.0
	$2 < m \leq 3.5$	16.0	23.0	33.0	46.0	65.0	92.0	131.0	185.0
	$3.5 < m \leq 6$	17.0	24.0	33.0	47.0	66.0	94.0	133.0	188.0
	$6 < m \leq 10$	17.0	24.0	34.0	48.0	68.0	97.0	137.0	193.0

表11-3　齿廓总偏差 F_a（GB/T 10095.1—2008）　　（单位：μm）

分度圆直径 d/mm	模数 m/mm	精度等级							
		3	4	5	6	7	8	9	10
$20 < d \leq 50$	$0.5 \leq m \leq 2$	2.6	3.6	5.0	7.5	10.0	21.0	21.0	29.0
	$2 < m \leq 3.5$	3.6	5.0	7.0	10.0	14.0	29.0	29.0	40.0
	$3.5 < m \leq 6$	4.4	6.0	9.0	12.0	18.0	35.0	35.0	50.0
	$6 < m \leq 10$	5.5	7.5	11.0	15.0	22.0	43.0	43.0	61.0
$50 < d \leq 125$	$0.5 \leq m \leq 2$	2.9	4.1	6.0	8.5	12.0	23.0	23.0	33.0
	$2 < m \leq 3.5$	3.9	5.5	8.0	11.0	16.0	31.0	31.0	44.0
	$3.5 < m \leq 6$	4.8	6.5	9.5	13.0	19.0	38.0	38.0	54.0
	$6 < m \leq 10$	6.0	8.0	12.0	16.0	23.0	46.0	46.0	65.0
	$10 < m \leq 16$	7.0	10.0	14.0	20.0	28.0	56.0	56.0	79.0
	$16 < m \leq 25$	8.5	12.0	17.0	24.0	34.0	68.0	68.0	96.0
$125 < d \leq 280$	$0.5 \leq m \leq 2$	3.5	4.9	7.0	10.0	14.0	28.0	28.0	39.0
	$2 < m \leq 3.5$	4.5	6.5	9.0	13.0	18.0	36.0	36.0	50.0
	$3.5 < m \leq 6$	5.5	7.5	11.0	15.0	21.0	42.0	42.0	60.0
	$6 < m \leq 10$	6.5	9.0	13.0	18.0	25.0	50.0	50.0	71.0

（续）

分度圆直径 d/mm	模数 m/mm	精度等级							
		3	4	5	6	7	8	9	10
$125<d\leqslant280$	$10<m\leqslant16$	7.5	11.0	15.0	21.0	30.0	60.0	60.0	85.0
	$16<m\leqslant25$	9.0	13.0	18.0	15.0	36.0	72.0	72.0	102.0
	$25<m\leqslant40$	11.0	15.0	22.0	31.0	43.0	87.0	87.0	123.0
$280<d\leqslant560$	$0.5\leqslant m\leqslant2$	4.1	6.0	8.5	12.0	17.0	33.0	33.0	47.0
	$2<m\leqslant3.5$	5.0	7.5	10.0	15.0	21.0	41.0	41.0	58.0
	$3.5<m\leqslant6$	6.0	8.5	12.0	17.0	24.0	48.0	48.0	67.0
	$6<m\leqslant10$	7.0	10.0	14.0	20.0	28.0	56.0	56.0	79.0
	$10<m\leqslant16$	8.0	12.0	16.0	23.0	33.0	66.0	66.0	93.0
	$16<m\leqslant25$	9.5	14.0	19.0	27.0	39.0	78.0	78.0	110.0
	$25<m\leqslant40$	12.0	16.0	23.0	33.0	46.0	92.0	92.0	131.0
	$40<m\leqslant70$	14.0	20.0	28.0	40.0	57.0	113.0	113.0	160.0
	$2<m\leqslant3.5$	6.0	8.5	12.0	17.0	24.0	48.0	48.0	67.0
	$3.5<m\leqslant6$	7.0	9.5	14.0	19.0	27.0	54.0	54.0	77.0
	$6<m\leqslant10$	8.0	11.0	16.0	22.0	31.0	62.0	62.0	88.0
	$10<m\leqslant16$	9.0	13.0	18.0	26.0	36.0	72.0	72.0	102.0
	$16<m\leqslant25$	11.0	16.0	22.0	31.0	44.0	88.0	88.0	125.0
	$25<m\leqslant40$	12.0	17.0	25.0	35.0	49.0	99.0	99.0	140.0
	$40<m\leqslant70$	15.0	21.0	30.0	42.0	60.0	120.0	120.0	170.0

表 11-4　螺旋线总偏差 F_β（GB/T 10095.1—2008）　　（单位：μm）

分度圆直径 d/mm	齿宽 b/mm	精度等级							
		3	4	5	6	7	8	9	10
$20<d\leqslant50$	$4\leqslant b\leqslant10$	3.2	4.5	6.5	9.0	13.0	18.0	25.0	36.0
	$10<b\leqslant20$	3.6	5.0	7.0	10.0	14.0	20.0	29.0	40.0
	$20\leqslant b\leqslant40$	4.1	5.5	8.0	11.0	16.0	23.0	32.0	46.0
	$40<b\leqslant80$	4.8	6.5	9.5	13.0	19.0	27.0	38.0	54.0
	$80<b\leqslant160$	5.5	8.0	11.0	16.0	23.0	32.0	46.0	65.0
$50<d\leqslant125$	$4\leqslant b\leqslant10$	3.3	4.7	6.5	9.5	13.0	19.0	27.0	38.0
	$10<b\leqslant20$	3.7	5.5	7.5	11.0	15.0	21.0	30.0	42.0
	$20\leqslant b\leqslant40$	4.2	6.0	8.5	12.0	17.0	24.0	34.0	48.0

（续）

分度圆直径 d/mm	齿宽 b/mm	精度等级							
		3	4	5	6	7	8	9	10
$50 < d \leqslant 125$	$40 < b \leqslant 80$	4.9	7.0	10.0	14.0	20.0	28.0	39.0	56.0
	$80 < b \leqslant 160$	6.0	8.5	12.0	17.0	24.0	33.0	47.0	67.0
	$160 < b \leqslant 250$	7.0	10.5	14.0	20.0	28.0	40.0	56.0	79.0
	$250 < b \leqslant 400$	8.0	12.0	16.0	23.0	33.0	46.0	65.0	92.0
$125 < d \leqslant 280$	$4 \leqslant b \leqslant 10$	3.6	5.0	7.0	10.0	14.0	20.0	29.0	40.0
	$10 < b \leqslant 20$	4.0	5.5	8.0	11.0	16.0	22.0	32.0	45.0
	$20 \leqslant b \leqslant 40$	4.5	6.5	9.0	13.0	18.0	25.0	36.0	50.0
	$40 < b \leqslant 80$	5.0	7.5	10.0	15.0	21.0	29.0	41.0	58.0
	$80 < b \leqslant 160$	6.0	8.5	12.0	17.0	25.0	35.0	49.0	69.0
	$160 < b \leqslant 250$	7.0	10.0	14.0	20.0	29.0	41.0	58.0	82.0
	$250 < b \leqslant 400$	8.5	12.0	17.0	24.0	34.0	47.0	67.0	95.0
	$400 < b \leqslant 650$	10.0	14.0	20.0	28.0	40.0	56.0	79.0	112.0
$280 < d \leqslant 560$	$10 < b \leqslant 20$	4.3	6.0	8.5	12.0	17.0	24.0	34.0	48.0
	$20 \leqslant b \leqslant 40$	4.8	6.5	9.5	13.0	19.0	27.0	38.0	54.0
	$40 < b \leqslant 80$	5.5	7.5	11.0	15.0	22.0	31.0	44.0	62.0
	$80 < b \leqslant 160$	6.5	9.0	13.0	18.0	26.0	36.0	52.0	73.0
	$160 < b \leqslant 250$	7.5	11.0	15.0	21.0	30.0	43.0	60.0	85.0
	$250 < b \leqslant 400$	8.5	12.0	17.0	25.0	35.0	49.0	70.0	98.0
	$400 < b \leqslant 650$	10.0	14.0	20.0	29.0	41.0	58.0	82.0	115.0
	$650 < b \leqslant 1000$	12.0	17.0	24.0	34.0	48.0	68.0	96.0	136.0
$560 < d \leqslant 1000$	$20 \leqslant b \leqslant 40$	5.0	7.5	10.0	15.0	21.0	39.0	41.0	58.0
	$40 < b \leqslant 80$	6.0	8.5	12.0	17.0	23.0	33.0	47.0	66.0
	$80 < b \leqslant 160$	7.0	9.5	14.0	19.0	274.0	39.0	55.0	77.0
	$160 < b \leqslant 250$	8.0	11.0	16.0	22.0	32.0	45.0	63.0	90.0
	$250 < b \leqslant 400$	9.0	13.0	18.0	36.0	36.0	51.0	73.0	103.0
	$400 < b \leqslant 650$	11.0	15.0	21.0	30.0	42.0	60.0	85.0	120.0
	$650 < b \leqslant 1000$	12.0	18.0	25.0	35.0	50.0	70.0	99.0	140.0

表 11-5　f'/k 的比值（GB/T 10095.1—2008）　　（单位：μm）

分度圆直径 d/mm	模数 m/mm	精度等级							
		3	4	5	6	7	8	9	10
$20 < d \leqslant 50$	$0.5 \leqslant m \leqslant 2$	7.0	10.0	14.0	20.0	29.0	41.0	58.0	82.0
	$2 < m \leqslant 3.5$	8.5	12.0	17.0	24.0	34.0	18.0	68.0	96.0
	$3.5 < m \leqslant 6$	9.5	14.0	19.0	27.0	38.0	54.0	77.0	108.0
	$6 < m \leqslant 10$	11.0	16.0	22.0	31.0	44.0	63.0	89.0	125.0
$50 < d \leqslant 125$	$0.5 \leqslant m \leqslant 2$	8.0	11.0	16.0	22.0	31.0	44.0	62.0	88.0
	$2 < m \leqslant 3.5$	9.0	13.0	18.0	25.0	36.0	51.0	72.0	102.0
	$3.5 < m \leqslant 6$	11.0	14.0	20.0	29.0	40.0	57.0	81.0	115.0
	$6 < m \leqslant 10$	12.0	16.0	23.0	33.0	47.0	66.0	93.0	132.0
	$10 < m \leqslant 16$	14.0	19.0	27.0	38.0	54.0	77.0	109.0	154.0
	$16 < m \leqslant 25$	16.0	23.0	32.0	46.0	65.0	91.0	129.0	183.0
$125 < d \leqslant 280$	$0.5 \leqslant m \leqslant 2$	8.5	12.0	17.0	24.0	34.0	49.0	69.0	97.0
	$2 < m \leqslant 3.5$	10.0	14.0	20.0	28.0	39.0	56.0	79.0	111.0
	$3.5 < m \leqslant 6$	11.0	15.0	22.0	31.0	44.0	62.0	88.0	124.0
	$6 < m \leqslant 10$	12.0	18.0	25.0	35.0	50.0	70.0	100.0	141.0
	$10 < m \leqslant 16$	14.0	20.0	29.0	41.0	58.0	82.0	115.0	163.0
	$16 < m \leqslant 25$	17.0	24.0	34.0	48.0	68.0	96.0	136.0	192.0
	$25 < m \leqslant 40$	21.0	29.0	41.0	58.0	82.0	116.0	165.0	233.0
$280 < d \leqslant 560$	$0.5 \leqslant m \leqslant 2$	9.5	14.0	19.0	27.0	39.0	54.0	77.0	109.0
	$2 < m \leqslant 3.5$	11.0	15.0	22.0	31.0	44.0	62.0	87.0	123.0
	$3.5 < m \leqslant 6$	12.0	17.0	24.0	34.0	48.0	68.0	96.0	136.0
	$6 < m \leqslant 10$	13.0	19.0	27.0	39.0	54.0	76.0	108.0	153.0
	$10 < m \leqslant 16$	15.0	22.0	31.0	44.0	62.0	88.0	124.0	175.0
	$16 < m \leqslant 25$	18.0	26.0	36.0	51.0	72.0	102.0	144.0	204.0
	$25 < m \leqslant 40$	22.0	31.0	43.0	61.0	86.0	122.0	173.0	245.0
	$40 < m \leqslant 70$	27.0	39.0	55.0	78.0	110.0	155.0	220.0	311.0

（续）

分度圆直径 d/mm	模数 m/mm	精度等级							
		3	4	5	6	7	8	9	10
$280<d\leqslant560$	$2<m\leqslant3.5$	12.0	17.0	24.0	34.0	49.0	69.0	97.0	137.0
	$3.5<m\leqslant6$	13.0	19.0	27.0	38.0	53.0	75.0	106.0	150.0
	$6<m\leqslant10$	15.0	21.0	30.0	42.0	59.0	84.0	118.0	167.0
	$10<m\leqslant16$	17.0	24.0	33.0	47.0	67.0	95.0	134.0	189.0
	$16<m\leqslant25$	19.0	27.0	39.0	55.0	77.0	109.0	154.0	218.0
	$25<m\leqslant40$	23.0	32.0	46.0	65.0	92.0	129.0	183.0	259.0
	$40<m\leqslant70$	29.0	41.0	57.0	81.0	115.0	163.0	230.0	325.0

表 11-6 径向综合总偏差 $\Delta F_i''$（GB/T 10095.1—2008） （单位：μm）

分度圆直径 d/mm	模数 m_n/mm	精度等级						
		4	5	6	7	8	9	10
$20<d\leqslant50$	$0.2\leqslant m_n\leqslant0.5$	9.0	13	19	26	37	52	74
	$0.5<m_n\leqslant0.8$	10	14	20	28	40	56	80
	$0.8\leqslant m_n\leqslant1.0$	11	15	21	30	42	60	85
	$1.0<m_n\leqslant1.5$	11	16	23	32	45	64	91
	$1.5<m_n\leqslant2.5$	13	18	26	37	52	73	103
	$2.5<m_n\leqslant4.0$	16	22	31	44	63	89	126
	$4.0<m_n\leqslant6.0$	20	28	39	56	79	111	157
	$6.0<m_n\leqslant10.0$	26	37	52	74	104	147	209
$50<d\leqslant125$	$0.2\leqslant m_n\leqslant0.5$	12	16	23	33	46	66	93
	$0.5<m_n\leqslant0.8$	12	17	25	35	49	70	98
	$0.8\leqslant m_n\leqslant1.0$	13	18	26	36	52	73	103
	$1.0<m_n\leqslant1.5$	14	19	27	39	55	77	109
	$1.5<m_n\leqslant2.5$	15	22	31	43	61	86	122
	$2.5<m_n\leqslant4.0$	18	25	36	51	72	102	144

（续）

分度圆直径 d/mm	模数 m_n/mm	精度等级						
		4	5	6	7	8	9	10
$50<d\leqslant125$	$4.0<m_n\leqslant6.0$	22	31	44	62	88	124	176
	$6.0<m_n\leqslant10.0$	28	40	57	80	114	161	227
$125<d\leqslant280$	$0.2\leqslant m_n\leqslant0.5$	15	21	30	42	60	85	120
	$0.5<m_n\leqslant0.8$	16	22	31	44	64	89	126
	$0.8\leqslant m_n\leqslant1.0$	16	23	33	46	65	92	131
	$1.0<m_n\leqslant1.5$	17	24	34	48	68	97	137
	$1.5<m_n\leqslant2.5$	19	26	37	53	75	106	149
	$2.5<m_n\leqslant4.0$	21	30	43	61	86	121	172
	$4.0<m_n\leqslant6.0$	25	36	51	72	102	144	203
	$6.0<m_n\leqslant10.0$	32	45	64	90	127	180	255
$280<d\leqslant560$	$0.2\leqslant m_n\leqslant0.5$	19	28	29	55	78	110	156
	$0.5<m_n\leqslant0.8$	20	29	40	57	81	114	161
	$0.8\leqslant m_n\leqslant1.0$	21	29	42	59	83	117	166
	$1.0<m_n\leqslant1.5$	22	30	43	61	86	122	172
	$1.5<m_n\leqslant2.5$	23	33	46	65	92	131	185
	$2.5<m_n\leqslant4.0$	26	37	52	73	104	146	207
	$4.0<m_n\leqslant6.0$	30	42	60	84	119	169	239
	$6.0<m_n\leqslant10.0$	36	51	73	103	145	205	290
	$0.5<m_n\leqslant0.8$	25	36	51	72	102	144	204
	$0.8\leqslant m_n\leqslant1.0$	26	37	52	74	104	148	209
	$1.0<m_n\leqslant1.5$	27	38	54	76	107	152	215
	$1.5<m_n\leqslant2.5$	28	40	57	80	114	161	228
	$2.5<m_n\leqslant4.0$	31	44	62	88	125	177	250
	$4.0<m_n\leqslant6.0$	35	50	70	99	141	199	281
	$6.0<m_n\leqslant10.0$	42	59	83	118	166	235	333

表 11-7 一齿径向综合偏差 f_i''(GB/T 10095.1—2008) (单位：μm)

分度圆直径 d/mm	模数 m_n/mm	精度等级						
		4	5	6	7	8	9	10
$20 < d \leq 50$	$0.2 \leq m_n \leq 0.5$	1.5	2.0	2.5	3.5	5.0	7.0	10.0
	$0.5 < m_n \leq 0.8$	2.0	2.5	4.0	5.5	7.5	11.0	15.0
	$0.8 \leq m_n \leq 1.0$	2.5	3.5	5.0	7.0	10.0	14.0	20.0
	$1.0 < m_n \leq 1.5$	3.0	4.5	6.5	9.0	13.0	18.0	25.0
	$1.5 < m_n \leq 2.5$	4.5	6.5	9.5	13.0	19.0	26.0	37.0
	$2.5 < m_n \leq 4.0$	7.0	10.0	14.0	20.0	29.0	41.0	58.0
	$4.0 < m_n \leq 6.0$	11.0	15.0	22.0	31.0	43.0	61.0	98.0
	$6.0 < m_n \leq 10.0$	17.0	24.0	34.0	48.0	67.0	95.0	135.0
$50 < d \leq 125$	$0.2 \leq m_n \leq 0.5$	1.5	2.0	2.5	3.5	5.0	7.5	10.0
	$0.5 < m_n \leq 0.8$	2.0	3.0	4.0	5.5	8.0	11.0	16.0
	$0.8 \leq m_n \leq 1.0$	2.5	3.5	5.0	7.0	10.0	14.0	20.0
	$1.0 < m_n \leq 1.5$	3.0	4.5	6.5	9.0	13.0	18.0	26.0
	$1.5 < m_n \leq 2.5$	4.5	6.5	9.5	13.0	19.0	26.0	37.0
	$2.5 < m_n \leq 4.0$	7.0	10.0	14.0	20.0	29.0	41.0	58.0
	$4.0 < m_n \leq 6.0$	11.0	15.0	22.0	31.0	44.0	62.0	87.0
	$6.0 < m_n \leq 10.0$	17.0	24.0	34.0	48.0	67.0	95.0	135.0
$125 < d \leq 280$	$0.2 \leq m_n \leq 0.5$	1.5	2.0	2.5	3.5	5.5	7.5	11.0
	$0.5 < m_n \leq 0.8$	2.0	3.0	4.0	5.5	8.0	11.0	16.0
	$0.8 \leq m_n \leq 1.0$	2.5	3.5	5.0	7.0	10.0	14.0	20.0
	$1.0 < m_n \leq 1.5$	3.0	4.5	6.5	9.0	13.0	18.0	26.0
	$1.5 < m_n \leq 2.5$	4.5	6.5	9.5	13.0	19.0	28.0	38.0
	$2.5 < m_n \leq 4.0$	7.5	10.0	15.0	21.0	29.0	41.0	58.0
	$4.0 < m_n \leq 6.0$	11.0	15.0	22.0	31.0	44.0	62.0	87.0
	$6.0 < m_n \leq 10.0$	17.0	24.0	34.0	48.0	67.0	95.0	135.0
$280 < d \leq 560$	$0.2 \leq m_n \leq 0.5$	1.5	2.0	2.5	4.0	5.5	7.5	11.0
	$0.5 < m_n \leq 0.8$	2.0	3.0	4.0	5.5	8.0	11.0	16.0
	$0.8 \leq m_n \leq 1.0$	2.5	3.5	5.0	7.5	10.0	15.0	21.0
	$1.0 < m_n \leq 1.5$	3.5	4.5	6.5	9.0	13.0	18.0	26.0
	$1.5 < m_n \leq 2.5$	5.0	6.5	9.5	13.0	19.0	27.0	38.0
	$2.5 < m_n \leq 4.0$	7.5	10.0	15.0	21.0	29.0	41.0	59.0
	$4.0 < m_n \leq 6.0$	11.0	15.0	22.0	31.0	44.0	62.0	88.0
	$6.0 < m_n \leq 10.0$	17.0	24.0	34.0	48.0	68.0	96.0	135.0

表 11-8 径向跳动 f_r（GB/T 10095.1—2008） （单位：μm）

分度圆直径 d/mm	模数 m_n/mm	精度等级							
		3	4	5	6	7	8	9	10
$20<d\leqslant50$	$0.5\leqslant m_n\leqslant2$	5.5	8.0	11.0	16.0	23.0	32.0	46.0	65.0
	$2<m_n\leqslant3.5$	6.0	8.5	12.0	17.0	24.0	34.0	47.0	67.0
	$3.5<m_n\leqslant6$	6.0	8.5	12.0	17.0	25.0	35.0	49.0	80.0
	$6<m_n\leqslant10$	6.5	9.5	13.0	19.0	26.0	37.0	52.0	74.0
$50<d\leqslant125$	$0.5\leqslant m_n\leqslant2$	7.5	10.0	15.0	21.0	29.0	42.0	59.0	83.0
	$2<m_n\leqslant3.5$	7.5	11.0	15.0	21.0	30.0	43.0	61.0	86.0
	$3.5<m_n\leqslant6$	8.0	11.0	16.0	22.0	31.0	44.0	62.0	88.0
	$6<m_n\leqslant10$	8.0	12.0	16.0	23.0	33.0	46.0	65.0	92.0
	$10<m_n\leqslant16$	9.0	12.0	18.0	25.0	35.0	50.0	70.0	99.0
	$16<m_n\leqslant25$	9.5	14.0	19.0	274.0	39.0	55.0	77.0	109.0
$125<d\leqslant280$	$0.5\leqslant m_n\leqslant2$	10.0	14.0	20.0	28.0	39.0	55.0	78.0	110.0
	$2<m_n\leqslant3.5$	10.0	14.0	20.0	28.0	40.0	56.0	80.0	113.0
	$3.5<m_n\leqslant6$	10.0	14.0	20.0	29.0	41.0	58.0	82.0	115.0
	$6<m_n\leqslant10$	11.0	15.0	21.0	30.0	42.0	60.0	85.0	120.0
	$10<m_n\leqslant16$	11.0	16.0	22.0	32.0	45.0	63.0	89.0	126.0
	$16<m_n\leqslant25$	12.0	17.0	24.0	34.0	48.0	68.0	96.0	126.0
	$25<m_n\leqslant40$	13.0	19.0	27.0	36.0	54.0	76.0	107.0	152.0
$280<d\leqslant560$	$0.5\leqslant m_n\leqslant2$	13.0	18.0	26.0	36.0	51.0	73.0	103.0	146.0
	$2<m_n\leqslant3.5$	13.0	18.0	26.0	37.0	52.0	74.0	105.0	148.0
	$3.5<m_n\leqslant6$	14.0	19.0	27.0	38.0	53.0	75.0	106.0	150.0
	$6<m_n\leqslant10$	14.0	19.0	27.0	39.0	55.0	77.0	109.0	155.0
	$10<m_n\leqslant16$	14.0	20.0	29.0	40.0	57.0	81.0	114.0	161.0
	$16<m_n\leqslant25$	15.0	21.0	30.0	43.0	61.0	86.0	121.0	171.0
	$25<m_n\leqslant40$	17.0	23.0	33.0	47.0	66.0	94.0	132.0	187.0
	$40<m_n\leqslant70$	19.0	27.0	38.0	54.0	76.0	108.0	153.0	216.0
	$2<m_n\leqslant3.5$	17.0	24.0	34.0	48.0	67.0	95.0	134.0	190.0
	$3.5<m_n\leqslant6$	17.0	24.0	34.0	48.0	68.0	96.0	136.0	193.0
	$6<m_n\leqslant10$	17.0	25.0	35.0	49.0	70.0	98.0	139.0	197.0
	$10<m_n\leqslant16$	18.0	25.0	36.0	51.0	72.0	102.0	144.0	204.0
	$16<m_n\leqslant25$	19.0	27.0	38.0	53.0	76.0	107.0	151.0	214.0
	$25<m_n\leqslant40$	20.0	29.0	41.0	57.0	81.0	115.0	162.0	229.0
	$40<m_n\leqslant70$	23.0	32.0	46.0	65.0	91.0	129.0	183.0	258.0

表 11-9 齿轮副中心距偏差 f_a（GB/T 10095.1—2008） （单位：μm）

齿轮副中心距 a/mm	精度等级		
	5～6	7～8	9～10
6 < a≤10	±7.5	±11	±18
10 < a≤18	±9	±13.5	±21.5
18 < a≤30	±10.5	±16.5	±26
30 < a≤50	±12.5	±19.5	±31
50 < a≤80	±15	±23	±37
80 < a≤120	±17.5	±27	±43.5
120 < a≤180	±20	±31.5	±50
180 < a≤250	±23	±36	±57
250 < a≤315	±26	±40.5	±65
315 < a≤400	±28.5	±44.5	±70
400 < a≤500	±31.5	±48.5	±77.5
500 < a≤630	±35	±55	±87
630 < a≤800	±40	±62	±100
800 < a≤1000	±45	±70	±115

11.4.2 齿轮精度等级和项目的选用

1. 齿轮精度等级的选用

齿轮精度等级的选用主要依据是其工作条件、用途以及技术要求，例如传递功率、圆周速度、运转精度、使用寿命等。大多数用类比法进行选择，见表11-10、表11-11。

表 11-10 各机械产品中的齿轮精度等级

应用范围	精度等级	应用范围	精度等级
测量齿轮	2～5	一般减速器	6～9
精密切削机床	3～6	一般切削机床	5～8
航空发动机	4～8	拖拉机	6～10
轻型汽车	5～8	重型汽车	6～9
地质矿山绞车	7～11	农业机械	8～11

表 11-11 各级精度适用圆周速度范围

精度等级	4 级	5 级	6 级	7 级	8 级	9 级
圆周速度/（m/s）	<35	<20	<15	<10	<6	<2

2. 精度项目的组合

精度项目的选择主要依据精度等级、项目间的协调、传递运动要求、生成量和检验费用等。各类齿轮推荐选用的精度项目组合见表 11-12。

表 11-12　各类齿轮推荐选用的精度项目组合

用途		分度、读数	航空、汽车、机车		拖拉机、减速器、农业机械
精度等级		3 ~ 5	4 ~ 6	6 ~ 8	7 ~ 12
传动要求	精确性	F_i'或F_p	F_i'或F_p	F_i''或F_r	F_i''或F_r
	平稳性	f_i'或F_α与$\pm F_{pt}$	f_i'或F_α与$\pm F_{pt}$	f_i''	$\pm F_{pt}$
	承载能力	F_β			

3. 齿轮坯的精度

齿轮坯的精度对加工精度也有一定的影响，若齿轮坯的精度较高，则能获得较高精度的齿轮。由于齿轮的齿廓、齿距等要素的精度都决定于齿轮坯的轴线位置误差，因此对齿轮坯精度的要求主要是其基准轴线并给出相关要素的几何公差要求。

4. 表面粗糙度

表面粗糙度直接影响齿轮使用要求，运转精度以及使用寿命。推荐表面粗糙度值见表 11-13。

表 11-13　表面粗糙度值（GB/Z 18620. 4—2008）　　（单位：μm）

等级	$m<6$		$6 \leqslant m \leqslant 25$		$m>25$	
	Ra	*Rz*	*Ra*	*Rz*	*Rz*	*Rz*
1	—	—	0. 04	0. 25	—	—
2	—	—	0. 08	0. 50	—	—
3	—	—	0. 16	1. 00	—	—
4	—	—	0. 32	2. 00	—	—
5	0. 50	3. 20	0. 63	4. 00	0. 08	5. 00
6	0. 80	5. 00	1. 00	6. 30	1. 25	8. 00
7	1. 25	8. 00	1. 60	10. 00	2. 00	12. 50
8	2. 00	12. 50	2. 50	16. 00	3. 20	20. 00
9	3. 20	20. 00	4. 00	25. 00	5. 00	32. 00
10	5. 00	32. 00	6. 30	40. 00	8. 00	50. 00
11	10. 00	63. 00	12. 50	80. 00	16. 00	100. 00
12	20. 00	125. 00	25. 00	160. 00	32. 00	200. 00

自测习题十一

1. 齿轮传动的使用要求有哪些？影响其传动精度的主要误差有哪些？

2. 解释一下齿轮传动中产生几何偏心和运动偏心的原因。

3. 简单叙述齿轮的各项指标，并分析各指标主要影响齿轮传动运动的哪一个特性。

4. 齿轮精度等级有哪些？是如何划分的？

5. 已知某渐开线直齿圆柱齿轮副模数 $m=3$mm，$Z_1=25$，$Z_2=100$，齿宽 $b=80$mm，精度等级为 8 级（GB/T 10095.1—2008）。试确定其主要精度项目的公差或极限偏差值。

参 考 文 献

［1］李柱．互换性与测量技术基础：上册［M］．北京：中国计量出版社，1984.
［2］何卫东．互换性与测量技术基础［M］．北京：北京理工大学出版社，2014.
［3］薛岩，等．公差配合新标准解读及应用示例［M］．北京：化学工业出版社，2014.
［4］张美芸，等．公差配合与测量［M］．北京：北京理工大学出版社，2010.
［5］毛平淮．互换性与测量技术基础［M］．北京：机械工业出版社，2011.
［6］柴畅．互换性与测量技术基础［M］．合肥：中国科学技术大学出版社，2014.
［7］于慧，等．互换性与技术测量基础［M］．北京：化学工业出版社，2014.
［8］屈波．互换性与技术测量［M］．北京：机械工业出版社，2014.
［9］魏斯亮，等．互换性与技术测量［M］．北京：北京理工大学出版社，2014.
［10］马保振，等．互换性与测量技术［M］．北京：清华大学出版社，2014.
［11］胡凤兰．互换性与技术测量基础［M］．北京：高等教育出版社，2010.
［12］任嘉卉，等．实用公差与配合技术手册［M］．北京：机械工业出版社，2014.
［13］王健石．实用公差与配合速查手册［M］．北京：中国电力出版社，2014.
［14］方昆凡．公差与配合速查手册［M］．北京：机械工业出版社，2013.

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037

电话服务

服务咨询热线：010-88379833
读者购书热线：010-88379649

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com
机工官博：weibo.com/cmp1952
教育服务网：www.cmpedu.com
金书网：www.golden-book.com



机械工业出版社微信公众号

机械工业出版社科普平台
科技有的聊

机械工业出版社制造业资讯
制造业那些事儿

上架指导 工业技术／机械工程／机械基础

ISBN 978-7-111-53423-5

策划编辑◎**黄丽梅** ／封面设计◎**陈沛**



定价：35.00元